

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh solárního nízkoteplotního Stirlingova motoru

Low-temperature Solar Stirling Engine Design

Student:

Vít Lebeda

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Míka, CSc.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Vít Lebeda**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Návrh solárního nízkoteplotního Stirlingova motoru**
Low-temperature Solar Stirling Engine Design

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh solárního nízkoteplotního Stirlingova motoru.

Práce bude obsahovat:

Popis současného stavu teplovzdušných motorů a jejich solárních aplikací

Výpočet rozměrů solárního nízkoteplotního Stirlingova motoru

Posouzení realizovatelnosti této koncepce

Seznam doporučené odborné literatury:

Organ, J., A. Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine, Cambridge University Press 2010, ISBN-10: 0521131790.

Míka, J. Teplovzdušné motory - motory budoucnosti. Text vypracovaný v rámci projektu CZ.1.07/1.1.00/08.0010, Ostrava 2013.

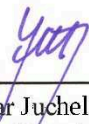
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Míka, CSc.**

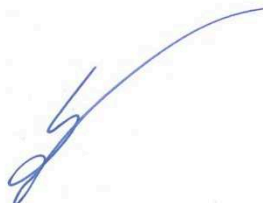
Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014





prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě
18.5.2014

.....
Vik Lebeda

podpis

Prohlašuji, že

jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).

souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

18.5.2014
V Ostravě

Vít Lebeda
.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Vít Lebeda

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Nádražní 169, 747 56 Dolní Životice

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Jiřímu Míkovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování této práce.

Děkuji také rodičům za celoživotní vedení k poznávání nových věcí, ochotu vždy vše vysvětlit a podporu.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

LEBEDA, V. *Návrh solárního nízkoteplotního Stirlingova motoru: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 63 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Míka, CSc.

Práce se zabývá Stirlingovým motorem. Jedná se o teplovzdušný motor s externím zdrojem tepla. Z tohoto důvodu je možné použít jakýkoli zdroj tepla. Patentován byl roku 1816. Práce popisuje historii, princip, výhody, nevýhody a jednotlivé modifikace Stirlingova motoru. Dále se zabývá již fungujícími solárními elektrárnami se Stirlingovým motorem a vlastním návrhem nízkoteplotního Stirlingova motoru na solární pohon. Dále pak využití Stirlingova motoru i v jiných odvětvích průmyslu ve světě a v České republice.

KLÍČOVÁ SLOVA: Stirlingův motor; Robert Stirling; princip; modifikace; kapalný dusík; solární aplikace; nízkoteplotní (LTD) Stirlingův motor; Schmidtova teorie; vakuový trubcový kolektor; žlabové sběrače; modelářství.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

LEBEDA, V. *Low-temperature Solar Stirling Engine Design: bachelor thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering, 2014, 63 p. Thesis head: doc. Ing. Jiří Míka, CSc.

The work deals with the Stirling engine. It is a hot engine with external combustion. For this reason, it is also possible to use non-noble fuel. It was patented in 1816. Thesis describes the history, principles, advantages, disadvantages, various modifications of the Stirling engine. It also deals with already functioning solar power Stirling engine and the own design of the low-temperature Stirling engine solar power. Furthermore, the use of the Stirling engine in other industries in the world and in the Czech Republic.

KEYWORDS: Stirling engine; Robert Stirling; principle; modification; liquid nitrogen; solar applications; low-temperature (LTD) Stirling engine; Schmidt's theory; vacuum tube collector; trough collectors; model making.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A ZKRATEK.....	9
1. ÚVOD	11
2. HISTORIE	12
3. PRINCIP	14
3.1 Chlazení Stirlingovým motorem.....	16
4. MODIFIKACE	17
4.1 Modifikace ALFA.....	18
4.2 Modifikace BETA	18
4.3 Modifikace GAMA	19
4.4 Pracovní médium	19
5. STIRLINGŮV MOTOR POHÁNĚNÝ KAPALNÝM DUSÍKEM.....	21
6. VÝHODY STIRLINGOVA MOTORU	25
7. NEVÝHODY STIRLINGOVA MOTORU.....	26
8. SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNA SE STIRLINGOVÝM MOTOREM	28
8.1 Model solární elektrárny se Stirlingovým motorem.....	32
9. NÍZKOTEPLTNÍ STIRLINGŮV MOTOR NA SOLÁRNÍ POHON.....	34
9.1 Popis konceptu	34
9.2 Výpočet rozměrů, teoretické vnitřní práce a výkonu	37
Schmidtova teorie	37
a) Výpočet výkonu pro minimální zdvih přemísťovacího pístu.....	38
b) Výpočet výkonu pro maximální zdvih přemísťovacího pístu	40
c) Zhodnocení.....	43
9.3 Porovnání vakuového kolektoru a žlabového sběrače	44
a) Vakuový trubicový kolektor	44
b) Žlabový sběrač.....	46
c) Zhodnocení.....	48
9.4 Konstrukce motoru	49
9.5 Výpočet množství oleje	52
a) Pro maximální zdvih přemísťovacího pístu	52
b) Pro minimální zdvih přemísťovacího pístu.....	53

9.6	Základní specifikace motoru	53
10.	STIRLINGŮV MOTOR V ČESKÉ REPUBLICE A VE SVĚTĚ	54
10.1	TEDOM s.r.o.	54
10.2	MSI	55
10.3	Dean Kamen	56
10.4	NASA.....	56
10.5	Modelářství	57
11.	ZÁVĚR.....	58
12.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	59

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A ZKRATEK

Použité veličiny

symbol veličiny	veličina	značka jednotky
A	Redukovaný teplotní rozdíl	$[W^{-1} \cdot K \cdot m^2]$
I	Intenzita slunečního záření dopadajícího na plochu kolektoru	$[W \cdot m^{-2}]$
P_{VN}	Teoretický vnitřní výkon	[W]
Q	Teplo	[J]
T	Teplota okolního vzduchu	[K]
V	Okamžitý celkový objem	$[m^3]$
a_1	Lineární součinitel	$[W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}]$
a_2	Nelineární součinitel	$[W \cdot K^{-2} \cdot m^{-2}]$
a_c	Teoretická vnitřní práce	[J]
c_p	Měrná tepelná kapacita	$[J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
m	Hmotnost	[Kg]
n	Otáčky	[ot/s]
p	Tlak	[Pa]
r	Měrná plynová konstanta	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
t	Teplota	[°C]
Δt	Rozdíl teplot	[°C]
φ	Hodnota fázového posuvu	[°]
μ	Účinnostní charakteristika kolektoru	[-]
μ_0	Optická účinnost kolektoru	[-]
ρ	Hustota	$[Kg \cdot m^{-3}]$

Zkratky a indexy

Zkratka	Značí
D	Škodlivý
E	Expanzní
K	Kompresní
P	Píst
R	Regenerátor
Z	Zdvihový
DE	Škodlivý expanzního
DK	Škodlivý kompresního
ZE	Zdvihový expanzního
ZK	Zdvihový kompresního
e	Okolní prostředí
s	Stagnační

1. ÚVOD

Při brouzdání na internetu a sledování videí na základní škole mě zaujala videa a animace Wanklova motoru. Postupně jsem se na všechny díval a „proklikával“ se dál a dál. Náhodou jsem narazil na video Stirlingova motoru. Tento motor mě zaujal svým principem a „jednoduchostí“. Začal jsem se o tento motor zajímat a studovat další materiály. Postupem času jsem dostal nápad, vyrobit si vlastní model. Věděl jsem, že základní princip motoru je založen na rozdílu teplot mezi ohřívanou a ochlazovanou částí motoru, tedy na roztažnosti vzduchu. Na všech videích a obrázcích byly motory zahřívány plamenem.

Rád experimentuji a zkouším nové věci. Když jsem byl na střední škole, napadlo mě, že by bylo velice zajímavé motor pouze chladit. Zdá se mi fascinující něco pouze chladit a ono se to bude točit.

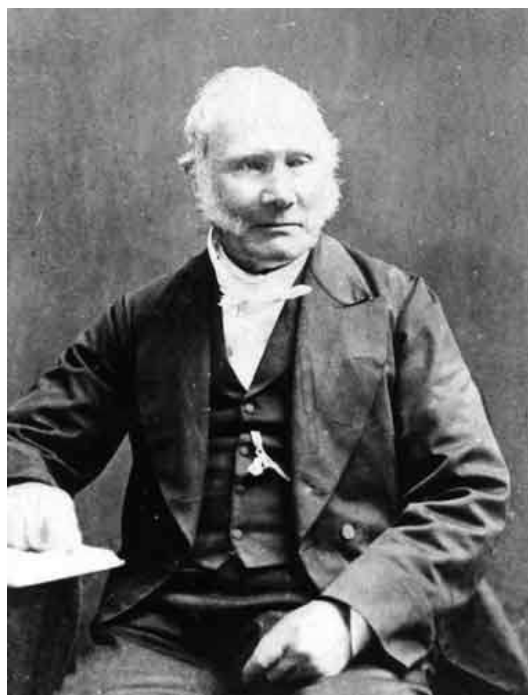
Na jedné výstavě jsem viděl přetaktování procesoru počítače. Chlazený byl pomocí kapalného dusíku. Jeho teplota je $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Okamžitě mi bylo jasné, čím budu motor chladit. Motor jsem vyrobil, ale z důvodu amatérské výroby a velkého tření v celém systému se motor nepodařilo rozběhnout. Vizualizace motoru je na obrázku 5.3. Skutečný motor na obrázku 5.1.

Chtěl jsem vyrobit také něco užitečnějšího a rozhodl jsem se pro model sluneční elektrárny se Stirlingovým motorem. Koupil jsem satelitní parabolu, polepil ji samolepicí zrcadlovou fólií a do ohniska umístil Stirlingův motor. Výsledek můžeme vidět na obrázku 8.10. Za poledního slunce dokázala elektrárna rozsvítit diodu.

Usoudil jsem, že tento systém je na našem území nepoužitelný. Je zde málo slunečních dnů bez mraků. Navíc by se musela parabola otáčet za sluncem.

Později mě napadl koncept, kdy by bylo možné použít Stirlingův motor na výrobu elektrické energie i v našich podmínkách. Rozhodl jsem se navrhnout nízkoteplotní Stirlingův motor na solární pohon. Můj cíl je navrhnout nízkoteplotní Stirlingův motor tak, aby ho bylo možné vyrobit v lépe vybavené domácí dílně. Při tomto předpokladu nebude potřeba extrémní přesnost výroby a bude možné využít běžně dostupné materiály. Dalším cílem je, aby bylo možné vyrábět elektřinu pouze, když bude potřeba. Na rozdíl od konvenčních způsobů výroby elektřiny ze solární energie. Předpokládaný výkon by měl být kolem 3 kW_e .

2. HISTORIE



Obr. 2.1 Robert Stirling [11]

Už v prvním století našeho letopočtu si Mechanikos všiml roztažnosti vzduchu v závislosti na ohřívání a ochlazování. Tomuto jevu se věnoval i Leonardo Da Vinci.

Seriózní bádání se začalo objevovat v 17. století. První zmínky o tzv. Stirlingovém motoru jsou od Sira George Cayley roku 1806, který si svůj vynález ale nenechal patentovat. Dnes je známý jako průkopník letectví.

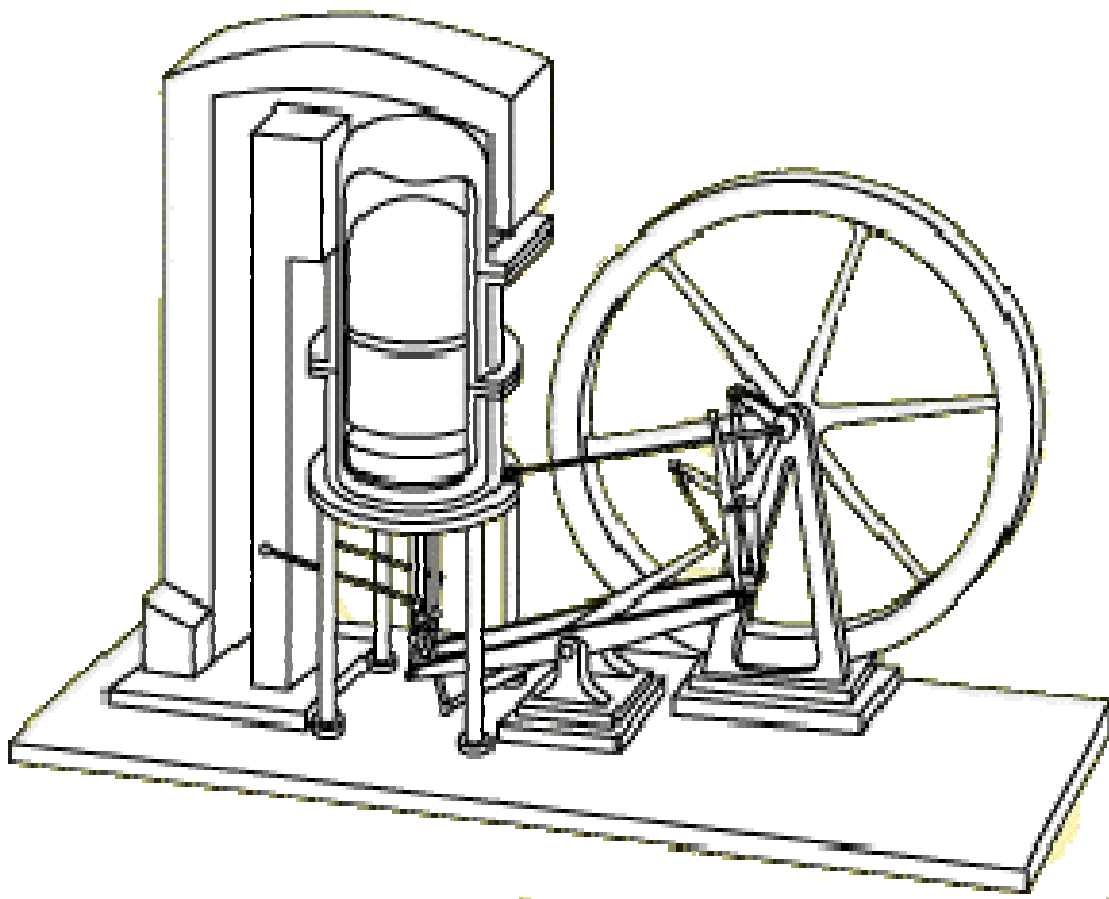
Technicky založený skotský pastor Robert Stirling, jehož jménem se dnes teplovzdušné motory často označují, vynalezl regenerátor, který významně zvyšuje účinnost celého motoru a roku 1816 si jej nechal patentovat. Motivací pro vymyšlení nového typu motoru byl údajně strach o lidi. Na začátku 17. stol. bylo mnoho smrtelných úrazů způsobených explozí parních kotlů, proto začal používat Stirlingův motor, který ke své činnosti nepotřebuje žádnou tlakovou nádobu. Tím je mnohem bezpečnější.

Motor měl už od začátku smůlu, protože v této době vyrukoval se svým lehkým motorem vynálezce Benz a teprve se vyvíjející Stirlingův motor s ním nemohl soutěžit. Stirling se své myšlenky nevzdal a v roce 1843 předělal parní stroj na vlastní systém. Při totožném výkonu 27 kW spotřeboval tento motor méně paliva a nevydával takový hluk. Po šesti měsících provozu prasklo dno válce. Tato závada se projevila opakovaně, proto stroj přepracoval zpět na páru. Motor pracuje s vysokými teplotami a v té době nebyly k dispozici žádné vhodné žáruvzdorné materiály, které by trvale vysokou teplotu vydržely.

Další významnou osobností byl John Ericsson, který experimentoval se sluneční elektrárnou na Stirlingův motor.

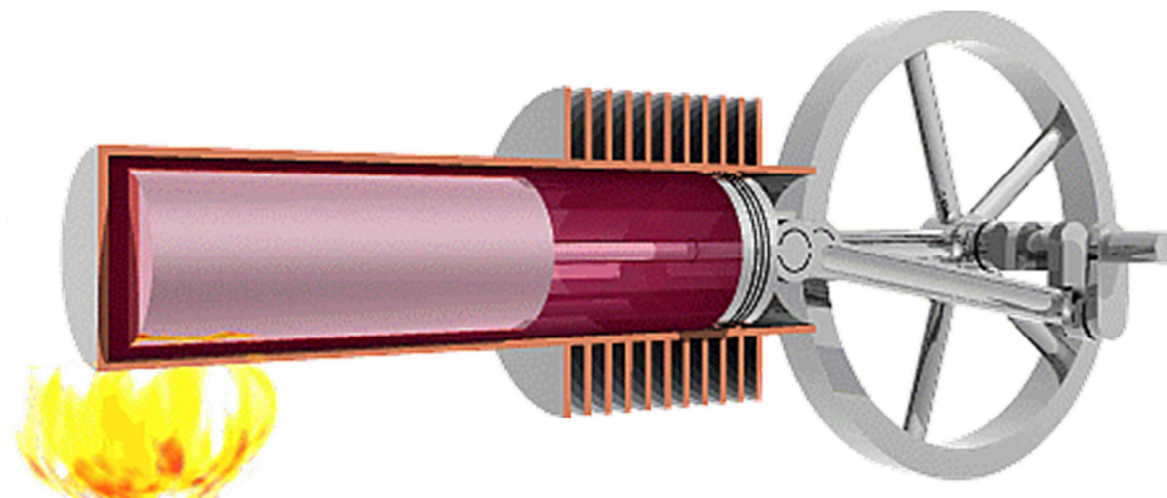
Na svém vrcholu stanuly teplovzdušné motory na přelomu 19. a 20. století. Před a během druhé světové války se Stirlingovým motorem intenzivně zabývala firma Philips. Hledala malý tichý generátor pro bezdrátové vysílací stanice, který by nerušil vysílání. V 50. letech 20. století začala firma Philips uvažovat o využití výsledků svého vývoje v dopravě. Postupně od ní koupily patent firmy GM a MAN. Později se k nim připojila firma United Stirling. Roku 1973 zakoupila firma Ford výhradní licenci na motory Stirling.

Z důvodu velmi tichého chodu byl během studené války vyvíjen Stirlingův motor také pro ponorky. Později vývoj ustal.



Obr. 2.2 Stirlingův motor z dob jeho vynalezení [12]

3. PRINCIP



Obr. 3.1 Stirlingův motor – modifikace beta [13]

Stirlingův motor patří mezi teplovzdušné motory s externím zdrojem tepla. Tímto zdrojem může být odpadní teplo, geotermální teplo, solární energie, fosilní paliva, biomasa nebo rozpad radioaktivního materiálu. Stirlingův motor pracuje na principu roztlačnosti plynu. Když se plyn ohřívá, roztahuje se, když se ochlazuje, svůj objem zmenšuje. Tento jev můžeme pozorovat, například pokud uzavřeme sklenici pružnou blánou a vzduch uvnitř sklenice ochladíme z pokojové teploty na nižší teplotu. Vzduch zmenší svůj objem a blána se protáhne dovnitř sklenice, jak můžeme vidět na obrázku 3.2. Naopak pokud vzduch uvnitř sklenice zahřejeme na vyšší než pokojovou teplotu, vzduch svůj objem zvětší a blána se protáhne nad okraj sklenice, jak můžeme vidět na obrázku 3.3.



Obr. 3.2 Studená sklenice [14]

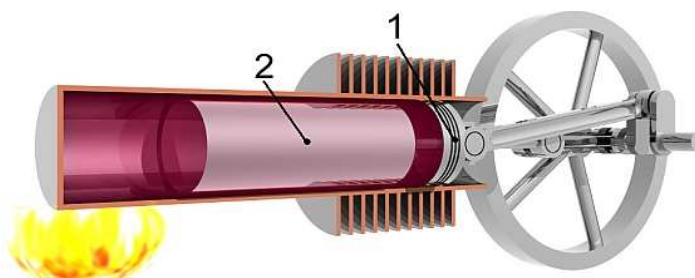


Obr. 3.3 Horká sklenice [15]

Stirlingův motor se skládá ze dvou pístů a jednoho nebo dvou válců, podle toho o jakou modifikaci se jedná. Stirlingovy motory můžeme rozdělit na tři modifikace. Modifikace alfa, beta a gama. Princip se nejlépe vysvětluje na modifikaci beta.

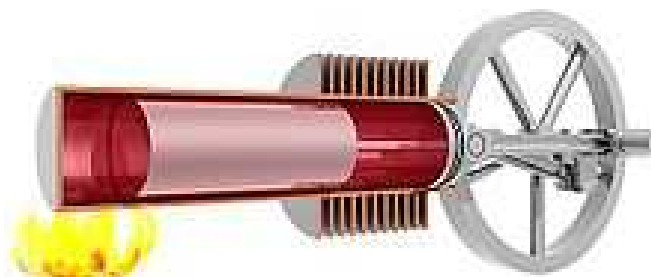
Modifikace beta se skládá z jednoho válce a dvou pístů (přemísťovacího a pracovního). Válec se na jedné straně ohřívá a na druhé chladí. Přemísťovací píst (delší, s vůlí mezi stěnou válce a pístem) a pístu pracovního (kratší a utěsněný). Pracovní a přemísťovací píst jsou spojeny klikovým mechanismem, který způsobuje zpoždění pístů o $\frac{1}{4}$ otáčky. Důležité je, aby byl celý motor dokonale utěsněn, aby nedocházelo k úniku média

(v našem případě vzduchu) z motoru. Důležitou součástí je také setrvačnick, který pomáhá motoru překonat mrtvý bod. A zajišťuje plynulý chod motoru.



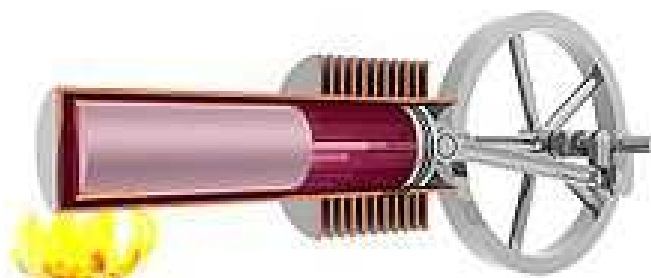
Obr. 3.4 Ohřívání media [16]

Přemísťovací píst (označený číslem 2) přemístil většinu vzduchu do ohřívané části válce. Zde se vzduch ohřívá, zvětšuje svůj objem, zvyšuje se tlak a vytlačuje pracovní píst (označený číslem 1) směrem ke klikovému mechanismu. Pracovní píst roztáčí setrvačnick, koná se tedy práce.



Obr. 3.5 Ohřáté medium [17]

Ohřátý vzduch zvětšil svůj objem a vytlačil pracovní píst do minimální vzdálenosti od klikového mechanismu. Přemísťovací píst začíná plyn přesouvat do chlazené části válce.



Obr. 3.6 Ochlazované medium [18]

Přemísťovací píst přemístil většinu plynu do chlazené části válce, kde se plyn ochlazuje a zmenšuje svůj objem.



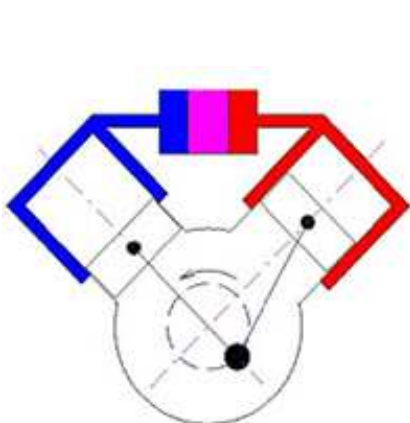
Obr. 3.7 Ochlazené medium [19]

Plyn zmenšil svůj objem a tlak. Pracovní píst je v maximální vzdálenosti od klikového mechanismu. Přemísťovací píst začíná plyn přesouvat do ohříváné části válce, kde se znovu ohřívá, vytlačuje pracovní píst do dolní úvrati. Celý cyklus se opakuje.

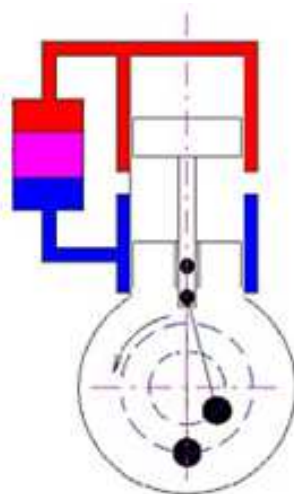
3.1 Chlazení Stirlingovým motorem

Stirlingův motor je možné použít také jako chladírenské zařízení. Funguje jako tepelné čerpadlo. Experimentálně to zjistila firma Philips roku 1950. Chlazení Stirlingovým motorem funguje tak, že se pohání proti směru otáčení cizím zdrojem. Během několika sekund začne teplota ohříváné části motoru padat hluboko pod nulu. Je možné dosáhnout teploty několik málo desítek Kelvinů. Při menší potřebě chlazení (teploty -40 až -30 °C) je chlazení pomocí Stirlingova motoru dražší než běžně používané způsoby. Ale při teplotách 40 až 60 K je cena srovnatelná. Tato teplota je dostačující pro zkapalnění vzduchu, který je možné použít pro získávání kapalného dusíku nebo kyslíku.

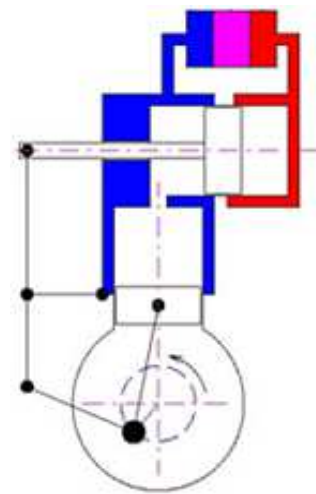
4. MODIFIKACE



Obr. 4.1 Modifikace alfa
[20]



Obr. 4.2 Modifikace beta
[21]



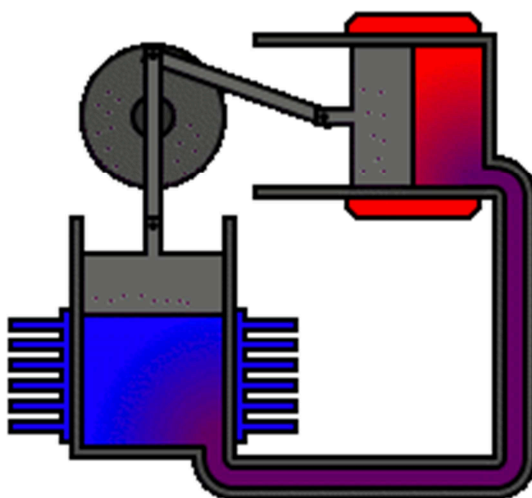
Obr. 4.3 Modifikace gama
[22]

Červeně je označena ohřívaná část motoru, modře ochlazovaná část. Fialově je znázorněn tzv. regenerátor. Také se dá říci ekonomizér. Je to velmi důležitá součást motoru, která významně zvyšuje účinnost. Bývá vyroben z kovu s dobrou tepelnou vodivostí. U modelu se většinou jedná o ocelové, niklové nebo měděné špony. Ty se vloží do vedení, které spojuje oba válce. Úkolem regenerátoru je zamezení plýtvání teplem. Teplý plyn se přežene do chlazené části, odevzdá část tepla regenerátoru a dochladí se. Při zpětném přepouštění se regenerátorem předežřeje a dožřeje se. Neplýtvá se tak teplem a stroj je efektivní.



Obr. 4.4 Moderní regenerátor [23]

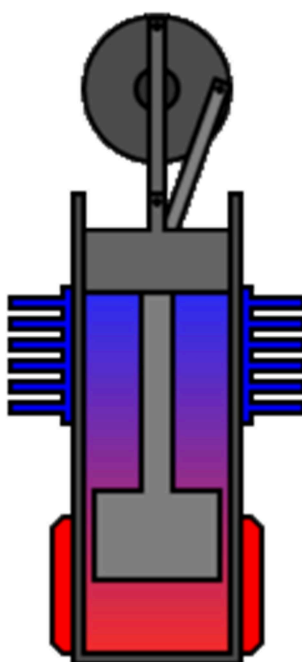
4.1 Modifikace ALFA



Obr. 4.5 Modifikace alfa [24]

U této modifikace se jeden válec zahřívá, druhý se chladí. Nevýhodou této modifikace je těsnění obou válců. Potřebuje ke svému chodu velký rozdíl teplot. Je nejpoužívanější modifikaci v praxi, protože je možné upravit běžný spalovací motor do V.

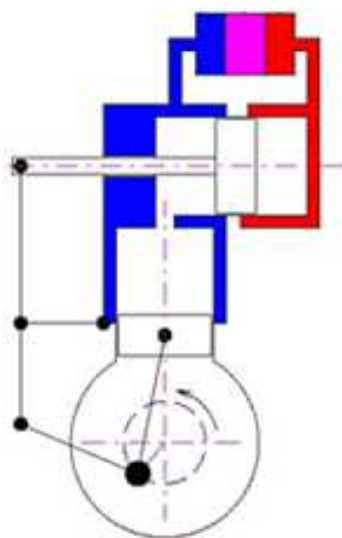
4.2 Modifikace BETA



Obr. 4.6 Modifikace beta [25]

Dalším typem je modifikace beta. Oba písty jsou v jednom válci. Spodní část se zahřívá, horní se chladí. Problém je s utěsněním ojnice pracovního pístu uvnitř expanzního válce.

4.3 Modifikace GAMA



Obr. 4.7 Modifikace gama [26]

O modifikaci gama by se dalo říci, že se jedná o modifikaci beta ve dvou válcích. Ohřívá se část expanzního válce, druhá část a pracovní válec se chladí. U modelů je to nejpoužívanější uspořádání.

4.4 Pracovní médium

Dnešní „Stirlingy“ vypadají úplně jinak, než tomu bylo v jejich začátcích. Dříve se v motorech používal obyčejný vzduch. Postupem času se ale zjistilo, že by bylo daleko efektivnější v motoru používat médium s větší tepelnou vodivostí například helium nebo vodík. Také se už nepoužívají atmosférické stroje, ale přetlak 10 MPa až 20 MPa. Toto umožňuje dosáhnout údajně účinnost až 55%.

Plyny mají různé fyzikální a chemické vlastnosti:

1. tepelná vodivost plynu – neboli rychlost jakou se teplo šíří z jedné části plynu do jiné, chladnější. Vliv této vlastnosti se projeví ve vysokých otáčkách motoru, kdy na průběh jednoho pracovního cyklu motoru zbývá jen velmi krátký čas. Dále se tato vlastnost zásadně projeví v takové konstrukci motoru, kdy je prostor tepelných výměníků (horký a studený konec motoru) velký a teplo musí urazit „dalekou cestu“, aby dorazilo do celého objemu plynu.

Pro použití ve Stirlingově motoru je vhodné, aby tepelná vodivost pracovního plynu byla co nejvyšší, tedy aby se teplo z horkého konce motoru přeneslo co nejrychleji do celého objemu pracovního plynu.

Tepelná vodivost daného plynu je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti (λ).

2. měrná tepelná kapacita plynu – neboli údaj o množství tepla potřebného pro to, aby se 1 kg plynu ohřál o 1 K.

Pro práci ve Stirlingově motoru je výhodné, aby malé množství dodaného tepla vyvolalo v pracovním plynu velkou změnu teploty (a tím i tlaku).

3. viskozita plynu – je veličina charakterizující vnitřní tření plynu a indikuje nám ztráty motoru vzniklé v důsledku protékání pracovního plynu prostory v motoru. Viskozita pracovního plynu je důležitá zejména pro konstrukce motorů s regenerátorem a vyspělými tepelnými výměníky.

4. velikost molekuly plynu – pracovní plyn je uzavřen ve vnitřním prostoru motoru a je nežádoucí, aby unikal ven. U plynu s malou molekulou se právě únik stává problémem.

5. molární hmotnost plynu (popř. hustota plynu) – tato veličina udává, kolik plynu se při určitém tlaku v našem motoru vlastně nachází a bude se účastnit pracovního cyklu. Čím více plynu se cyklu v motoru účastní, tím větší výkon můžeme očekávat. Proto jsou v praxi výkonné Stirlingovy motory vždy natlakovány. Tomu ovšem musí odpovídat jejich konstrukce, zejména v oblasti těsnosti a dimenzování tepelných výměníků.

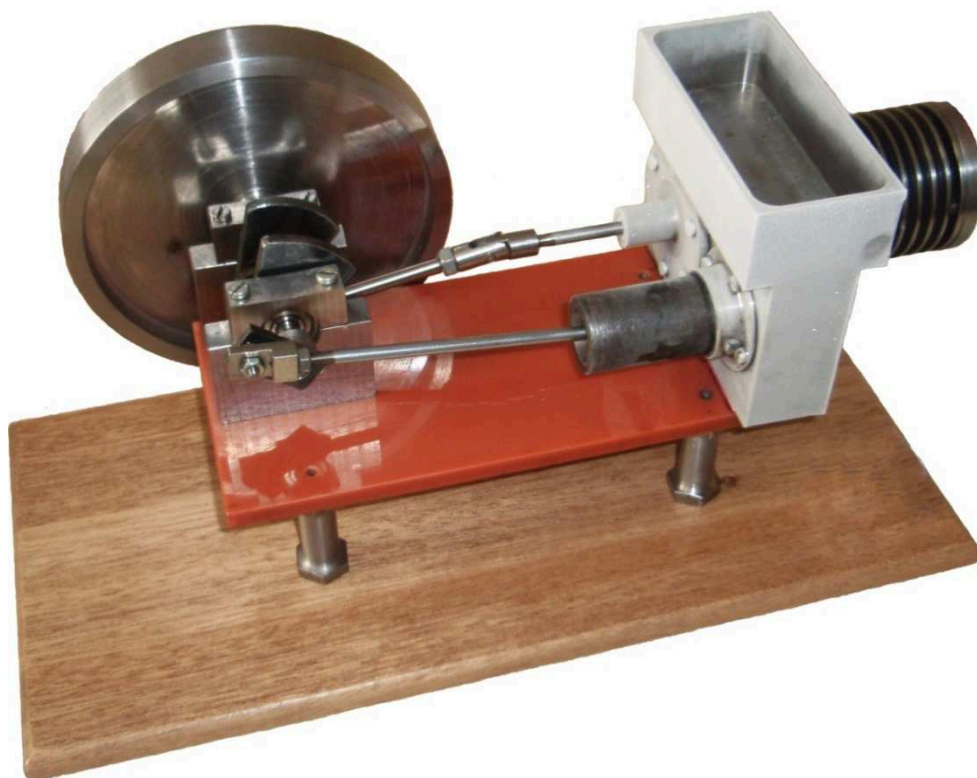
6. chemická reaktivita plynu – tato vlastnost plynu ovlivňuje např. životnost součástek motoru popř. bezpečnost jeho provozu.

V praxi přichází v úvahu pouze tři plyny. Vzduch (popř. čistý dusík), helium a vodík.

	Vodík (H ₂)	Helium (He)	Vzduch
Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,181	0,151	0,026
Měrná tepelná kapacita c _p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	14 310	52 000	1 003
Měrná tepelná kapacita c _v [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	10 180	3 120	719
Měrná tepelná kapacita [J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]	28,8	20,8	29,1
Hustota ρ[kg.m ⁻³]	0,09	0,18	1,28
Viskozita ν[Pa.s ⁻¹]	9,13 . 10 ⁻⁶	1,98 . 10 ⁻⁵	1,98 . 10 ⁻⁵

Tab. 4.1 Přehled vlastností plynů [10]

5. STIRLINGŮV MOTOR POHÁNĚNÝ KAPALNÝM DUSÍKEM



Obr. 5.1 Stirlingův motor s kapalným dusíkem v nádobce

Tento motor jsem začal vyrábět jako první v pořadí. Nejprve jsem hledal informace o Stirlingově motoru na kapalný dusík. Na českém internetu ani na cizojazyčném internetu jsem žádné informace nenašel. Dospěl jsem k závěru, že toto „palivo“ nejspíš ještě nikdo nepoužil. Lákal mě ještě víc motor na kapalný dusík postavit. Po nějaké době jsem našel video na youtube.com, které prezentovalo plechovkový Stirlingův motor na kapalný dusík. Znamenalo to, že nejsem jediný, kdo měl podobný nápad. Na druhou stranu bylo příjemné zjištění, že je možné něco podobného vyrobit.

Pustit se do výroby nebylo snadné, neměl jsem potřebné znalosti pro výpočet rozměrů a konstrukci motoru. Po usilovném pátrání jsem našel výkresy, které byly téměř podle mých představ. Nebyly v moc dobrém stavu, navíc jsem potřeboval motor upravit na kapalný dusík. Rozhodl jsem se tedy překreslit výkresy pomocí programu Autodesk AutoCAD. Sestavu celého motoru na kapalný dusík můžeme vidět na obrázku 5.2. Model motoru vymodelovaný v programu Autodesk Inventor můžeme vidět na následujícím obrázku 5.3.

Zjistil jsem, že motor stačí zahřívat kostkou suchého líhu. Z toho vyplývá, že rozdíl teplot musí být okolo 200 °C. Moje plány byly následující: Teplota okolního vzduchu (cca 20 °C) bude ohřívat teplou část motoru (expanzní válec). Kapalný dusík (-196 °C) bude chladit kompresní prostor. Po započtení ztrát vedením a přestupem by měl být rozdíl teplot pro správný chod motoru dostatečný.

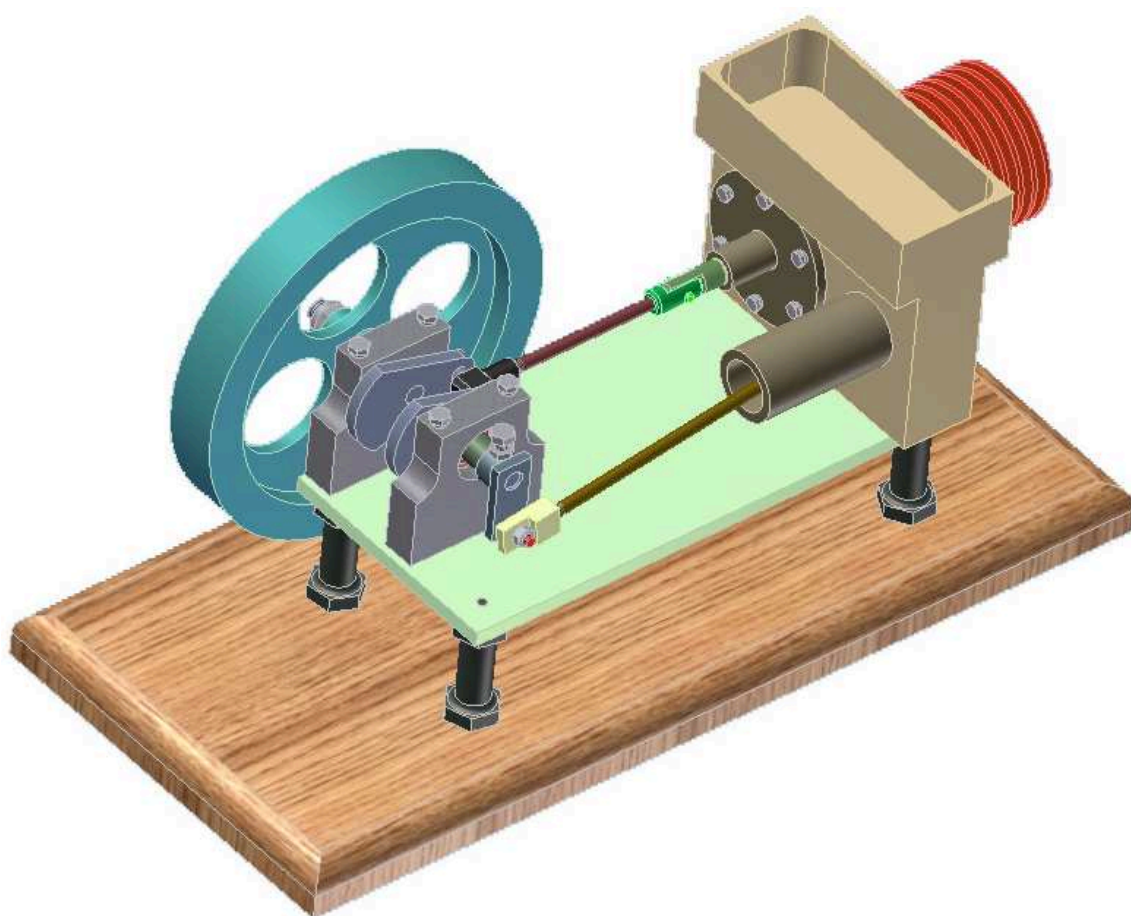
Teplotou kapalného dusíku -196°C sice dosáhneme potřebného rozdílu teplot mezi kompresní a expanzní částí motoru, ale tato teplota také přináší spoustu problémů. Například je nutné zamezit celkovému ochlazení motoru. Po chvíli chodu by celý zamrzl, zanikl by potřebný rozdíl teplot a motor by se zastavil. Problém jsem vyřešil tak, že jsem mezi expanzní válec (v našem případě ten s žebry) a desku s nádobkou na dusík vložil kroužek teflonu, který zabrání ochlazování části expanzního válce, která má být ohřívána. Ochlazování kompresního válce je nutné, aby motor správně pracoval. Dále bylo nutno odizolovat desku s nádobkou zespodu. Nosnou desku jsem tedy vyrobil z umělé hmoty. Také bylo potřeba zaizolovat kompresní válec od zbytku motoru. Tuto izolaci jsem vyřešil také pomocí teflonu. Expanzní píst, přes který by se ochlazoval zbytek motoru je vyroben z bronzového jádra a teflonového pouzdra. Důvod této konstrukce je popsán níže. Dále bylo nutno odizolovat ucpávku expanzního válce. Ojnice se pohybuje v teflonovém pouzdře. Ochlazování motoru přes ucpávku expanzního válce by nemělo negativní vliv na správnou funkci motoru, ale zbytečně by se zvyšovala spotřeba kapalného dusíku.

Problém nastal i při mazání motoru. Protože atmosférické modely Stirlingova motoru mají velmi malý výkon, je potřeba snížit tření na minimum a všechny otáčející se součásti navrhnout a vyrobit s co nejnižší hmotností. U běžných modelů se proto neustále oba písty zakapávají olejem. Olej také přispívá k lepšímu utěsnění celého systému. Mazat expanzní píst olejem jsem si dovolit nemohl. Každá kapalina při teplotě -196°C by zmrzla nebo ztuhla. Ideální se zdálo vyrobit píst z teflonu, který má extrémně nízký součinitel tření (na oceli 0,07 až 0,11) což je druhý nejnižší ze všech známých pevných materiálů (diamant má nejméně). Později jsem zjistil, že teflon se při zahřívání a ochlazování příliš roztahuje a smršťuje. Nakonec se ukázalo, že nejlepší bude vyrobit píst z bronzového jádra a teflonového pouzdra.

Výrobu motoru jsem zdárně dokončil. Výsledek můžeme vidět na obrázku 5.1. Nyní byla na řadě otázka zajištění kapalného dusíku. Jako nejdostupnější se jevila inseminační stanice. Po vysvětlení problému mi kapalný dusík poskytli. Jeden litr stál okolo 20 Kč.

Z důvodu amatérské výroby a velkého tření v celém systému se motor nepodařilo rozběhnout. Uvažoval jsem, že bych motor zahříval plamenem, abych zvýšil rozdíl teplot, ale z důvodu konstrukce pro nízké teploty a použití materiálů, které mají nízkou teplotu tavení, toto není možné.

Na tomto obrázku můžeme vidět Stirlingův motor na kapalný dusík vymodelovaný v programu Autodesk Inventor.

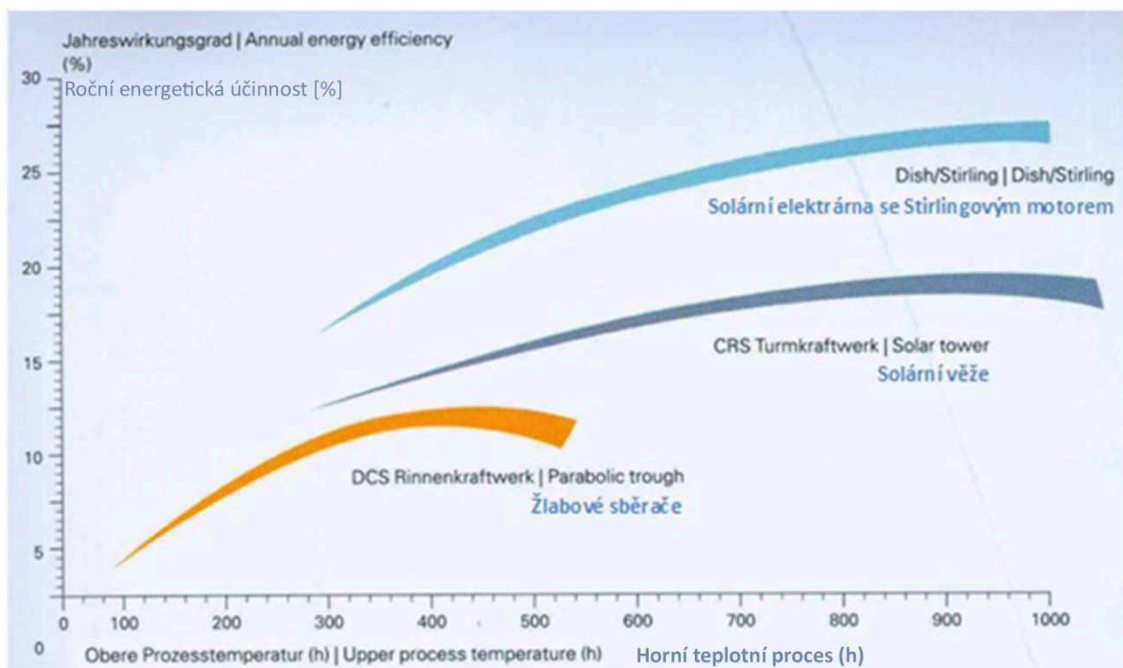


Obr. 5.3 Model Stirlingova motoru na kapalný dusík v programu Autodesk Inventor

6. VÝHODY STIRLINGOVA MOTORU

Právě pro Stirlingův motor jsem se rozhodl také z těchto důvodů:

Stirlingův motor má externí přívod tepla. Z tohoto důvodu není závislý na spalování ušlechtilých paliv, jak je tomu u motorů s vnitřním spalováním. Dokáže tedy využít jakýkoli zdroj tepla. Například odpadní teplo, geotermální teplo, solární energie, fosilní paliva, biomasu nebo rozpad radioaktivního materiálu. Další nespornou výhodou externího spalování je, že spaliny nepůsobí přímo na píst či lopatky stroje, jak je tomu například u klasických motorů nebo turbín, což má velký význam třeba při spalování biomasy. Dále má velmi tichý a klidný chod. Oproti jiným motorům má minimum pohyblivých částí a mnohem jednodušší konstrukci. Z toho plyne, že je téměř bezporuchový a má vyšší životnost. Nemá žádné ventily z pohledu spalovacích motorů a není nutné ho přehřívat z pohledu parního stroje. Díky tomu, že je možné spalovat palivo externě, je možné dosáhnout mnohem vyšší efektivity a dokonalosti spalování, z čehož plynou velice příznivé emisní hodnoty. Stirlingův motor je jediným pístovým motorem, který dokáže teplo ze slunečního záření přeměnit přímo na mechanickou a následně elektrickou energii. Stirlingův motor dokáže přeměňovat sluneční energii na elektrickou neúčinněji ze všech známých solárních systémů.



Obr. 6.1 Porovnání účinností třech hlavních solárních tepelných systémů [27]

7. NEVÝHODY STIRLINGOVA MOTORU

Stirlingův motor není zázračný stroj, jak by se mohlo na první pohled zdát. Samozřejmě má jako každé jiné strojní zařízení svá omezení, nevýhody a úskalí.

Mezi největší nevýhody patří: Trvalá, vysoká pracovní teplota ohříváku. Donedávna to byl poměrně velký problém, protože nebyly kvalitní žáruvzdorné materiály. Postupem času se dostávají na trh stále dokonalejší materiály, které jsou schopny bez problémů snášet stále vyšší teploty a také větší rozdíly teplot. Zanedbatelná nebyla také vysoká cena těchto extrémně odolných materiálů, ale i tato stránka začíná být příznivější.

Dalším velkým problémem tohoto motoru je vysoký tlak média uvnitř motoru. Je totiž nutné mít uvnitř motoru co nejvíce plynu, který by mohl zvětšovat a zmenšovat svůj objem a zvyšovat tak účinnost motoru. Tlak pracovního média v dnešních moderních jednotkách dosahuje hodnot 10 – 20 MPa. Běžné Stirlingy mají menší výkon na jednotku hmotnosti ve srovnání se spalovacím motorem. Nezanedbatelné je také těsnění motoru, které je při vysokých tlacích a zároveň zachování nízkého tření velmi obtížné.

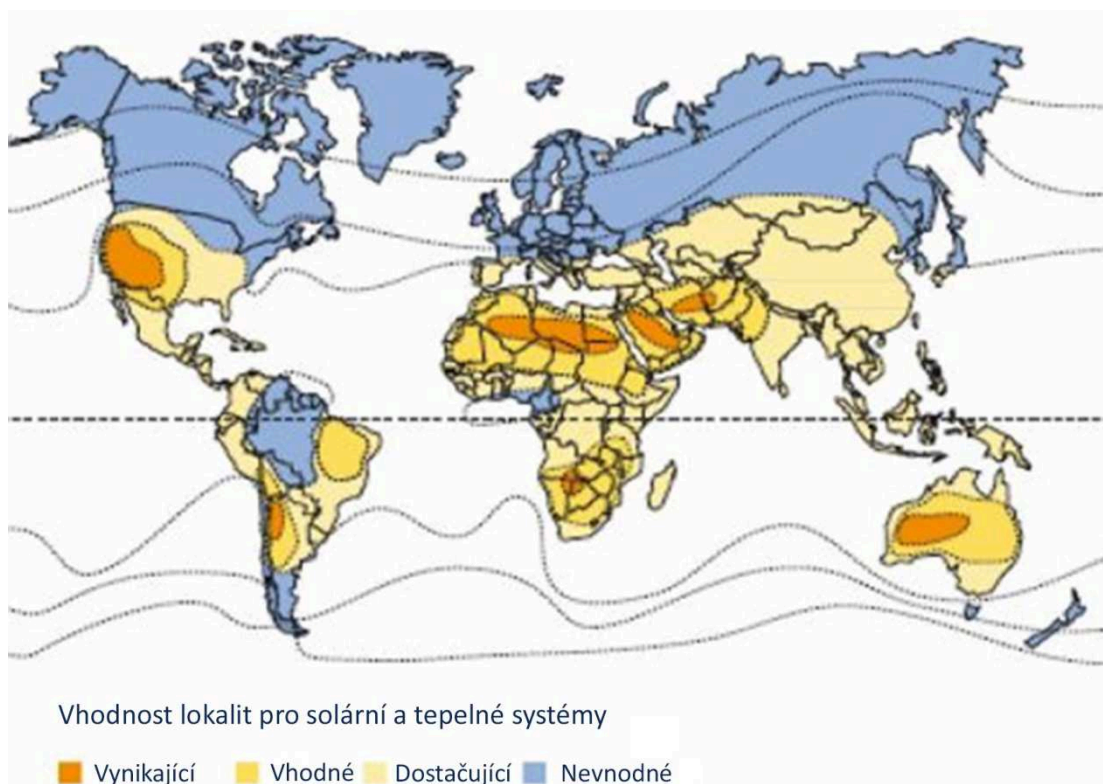
Nevýhodou pro mobilní využití motoru byl také obtížně regulovatelný výkon motoru, ale s nástupem dnešních moderních motorů je tento problém také zanedbatelný. Motoru se „jednoduše“ upustí tlak do jiného výměníku a výkon motoru rapidně klesne. V případě nutnosti vyššího výkonu se médium do systému zase vrátí a výkon stoupne. Stirlingův motor tak dosahuje rychlejší regulace výkonu než běžné spalovací motory.

Tyto konstrukčně náročné doplňky ale motor výrazně prodražují. Stirlingův motor výkonnostně srovnatelný se spalovacím motorem stojí 2 – 3 krát více. Toto je způsobeno také tím, že se Stirlingy vyrábí jen v malých sériích. Vysoká cena oproti konvenčním spalovacím motorům je dána také tím, že tyto motory mají za sebou desítky let intenzivního a velmi nákladného vývoje.

Z těchto důvodů je třeba velice pečlivě zvážit, kde Stirlingův motor aplikovat. Nejspíše tam, kde nelze použít jiné motory vůbec nebo kde bude mít Stirlingův motor jasné provozně ekonomické výhody.

Velmi dobře návratné jsou například tyto aplikace:

- Výroba elektřiny ze solární energie v oblastech s úhrnem nad $2\,000\text{ kWh/m}^2/\text{rok}^{-1}$. Tyto oblasti můžeme vidět na obrázku 7.1.
- Výroba elektřiny spalováním plynů, které mají nízkou výhřevnost nebo jsou těžce spalitelné v konvenčních motorech s vnitřním spalováním.
- Výroba elektřiny spalováním recentních paliv.



Obr. 7.1 Vhodnost světových lokalit pro solární a tepelné systémy [28]

8. SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNA SE STIRLINGOVÝM MOTOREM

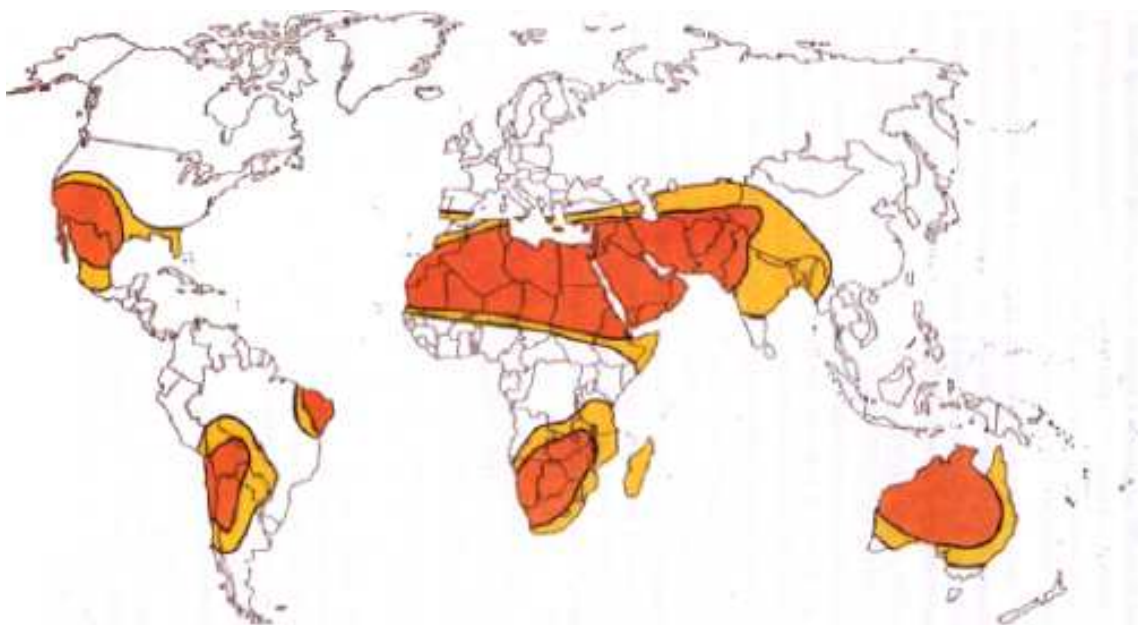
Nejdále jsou zřejmě v Americe, kde vyrostla první komerčně využívaná elektrárna (obr. 8.1) o výkonu 1,5 MW, skládá se z 60 jednotek o výkonu 25 kW. Tato elektrárna se nachází v Arizoně.



Obr. 8.1 Elektrárna se Stirlingovým motorem o výkonu 1,5 MW [29]

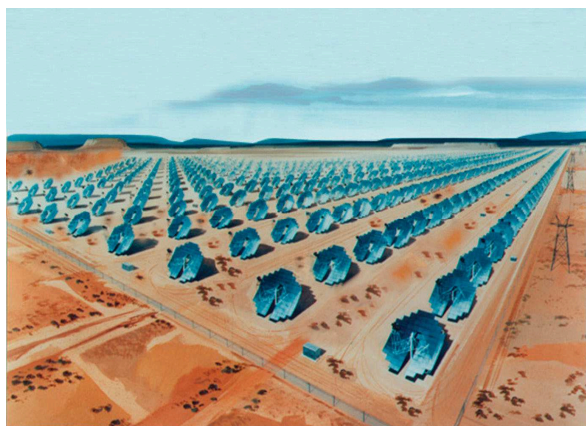
Firma říká, že toto je jen první malý projekt. V plánu má postavit dvě mnohem větší elektrárny v Kalifornii. První o výkonu 900 MW bude vybudovaná v San Diegu a druhá o výkonu 850 MW má stát v Edisonu. Projekt měl být realizován už v průběhu roku 2010, ale z důvodu byrokratických povolení a nedostatku financí byla stavba odložena. Každá z elektráren se měla rozkládat na ploše okolo 3 400 ha. Elektrárna bude založena na jednotce o výkonu 25 kW. To znamená, že elektrárnu bude tvořit 34 000 jednotek pro dosažení celkového výkonu 850 MW, respektive 36 000 jednotek pro dosažení 900 MW. Tento systém nese název SunCatcher. Pracovní medium motoru je vodík. Odrazová plocha se skládá z 38 tvarovaných zrcadel. Díky podobnosti tvaru se polotovary zrcadel vyrábí na lisech, které se používají v automobilovém průmyslu při výrobě kapot. SunCatcher vytvořil nový světový rekord v účinnosti solárních aplikací, se svými 31,25 % překonal rekord 29,4 % z roku 1984.

Stavba by se měla nacházet v pouštních oblastech jižní Kalifornie. Zde je jak můžeme vidět na obrázku 8.2 největší podíl slunečního svitu v USA. Na obrázku 8.2 můžeme také vidět další místa, která jsou vhodná pro aplikaci solárních systémů. Výrobní cena jednotky je v současné době extrémně vysoká, ale při sériové výrobě se předpokládá výrazný pokles ceny.



Obr. 8.2 Místa vhodná pro využití solárních aplikací [30]

Elektrárny v Kalifornii, ale také již postavena elektrárna v Arizoně, se skládá z motorů druhé generace. Odrazová část se skládá ze 40 místo původních 80 částí. Odrazová plocha nemá tvar obdélníku, jak tomu bylo u motoru první generace, ale kruhu. Motor také obsahuje o 60 % méně mechanických částí, což umožnilo výraznou úsporu oceli a zlevnění celé jednotky. Předpokládá se, že 90 % součástek se bude vyrábět v USA.



Obr. 8.3 Solární elektrárny se Stirlingovým motorem [31]



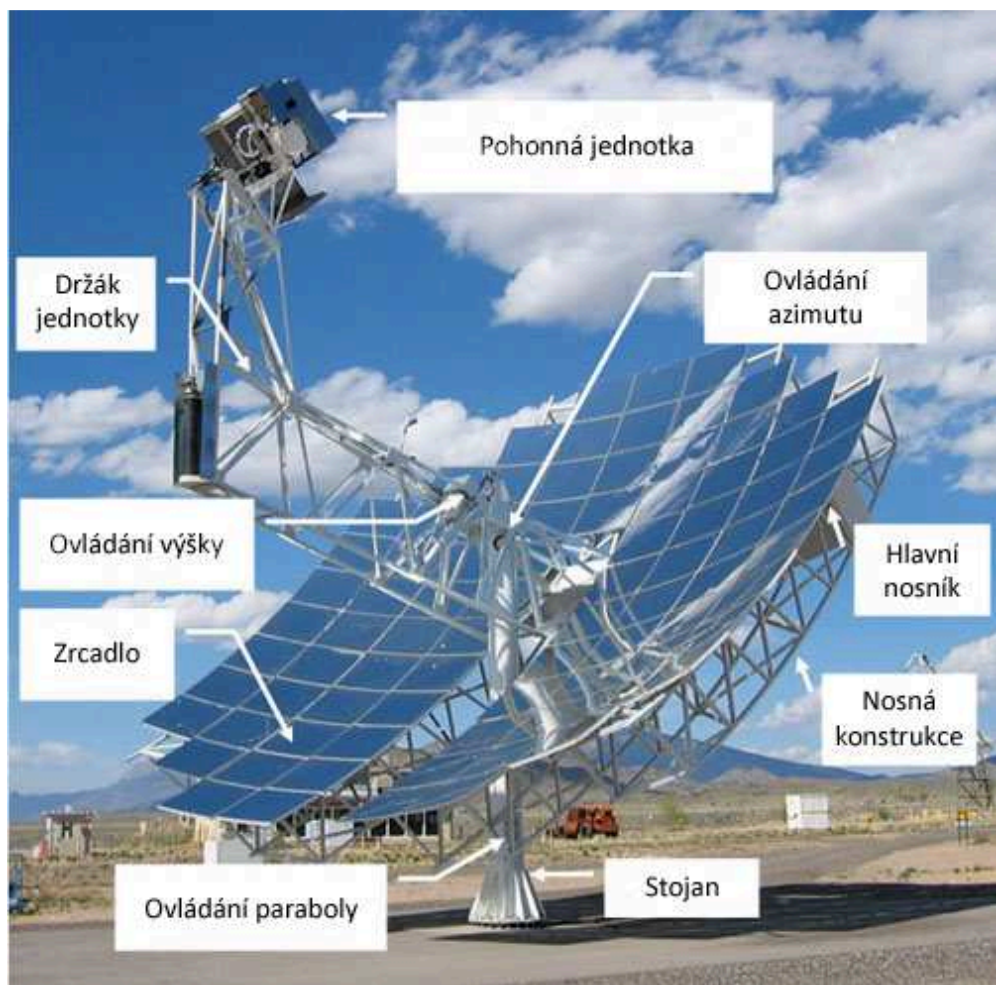
Obr. 8.4 Solární elektrárny se Stirlingovým motorem [32]



Obr. 8.5 SunCatcher první generace [33]



Obr. 8.6 SunCatcher druhé generace [34]



Obr. 8.7 Popis SunCatcheru [35]



Obr. 8.8 Popis motoru SunCatcheru [36]

8.1 Model solární elektrárny se Stirlingovým motorem



Obr. 8.10 Model solární elektrárny se Stirlingovým motorem

Tento model jsem začal vyrábět jako druhý v pořadí. Bylo mi jasné, že Stirlingův motor poháněný kapalným dusíkem nemá v praxi využití, proto jsem chtěl vyrobit něco užitečnějšího.

Solární elektrárna se Stirlingovým motorem v podstatě vychází ze solární elektrárny typu diskový sběrač. Parabolické zrcadlo soustředí sluneční paprsky dopadající na jeho povrch do ohniska, kde je umístěn Stirlingův motor. Aby byla zajištěna co nejvyšší účinnost a využití zrcadla během celého dne, natáčí elektromotor parabolu za Sluncem.

Pro výrobu mého modelu sluneční elektrárny se Stirlingovým motorem by bylo nejvýhodnější velké parabolické zrcadlo, které má největší procento odrazivosti dopadajících paprsků. Odhadem jsem určil, že pro můj pokus bude dostačující zrcadlo o průměru cca 1 metr.

Hledal jsem potřebné zrcadlo. Bohužel jsem se dověděl, že u nás běžně vyráběná parabolická zrcadla mají maximální průměr 600 mm, což by do mé sluneční elektrárny nejspíše stačilo. Problém byl v tom, že toto zrcadlo stojí kolem 140 000 Kč. Zrcadlo slouží pro hvězdářské účely, pro můj model by bylo zbytečně přesné a kvalitní. Levnější zrcadlo se mi na českém trhu najít nedařilo. Zjistil jsem, že v Americe je možné koupit parabolické zrcadlo, které by mi vyhovovalo. Průměr 890 mm by byl dostačující, cena kolem 8 000 Kč. Ani tuto částku jsem nebyl ochoten pouze do zrcadla investovat.

Musel jsem tedy vymyslet jiné řešení. Jako nevhodnější se jevilo pořídit větší satelitní parabolu a polepit ji samolepící zrcadlovou folií. Provedení nebude tak kvalitní a trvanlivé jako originální parabolické zrcadlo, ale pro můj pokus bude snad dostačující. Také mě napadlo nařezat čtverečky o délce strany cca 10 mm z rovinného zrcadla a polepit jimi parabolu. Tento způsob se mi jevil jako velmi pracný s nejistým výsledkem, proto jsem zvolil již zmiňovanou samolepící zrcadlovou folii.

Také jsem zvažoval, zda do ohniska umístit nízkoteplotní Stirlingův motor, který by se rozběhl a vyráběl elektřinu už při nízké teplotě, zejména časně ráno a k večeru, kdy slunce ještě tolik nehřeje. Při poledním slunci by použití nízkoteplotního motoru v tomto konceptu ztrácelo smysl. Proto si myslím, že vhodnější bude použít klasický výkonný vysokoteplotní motor, který dokáže plně využít potenciál poledního slunce.

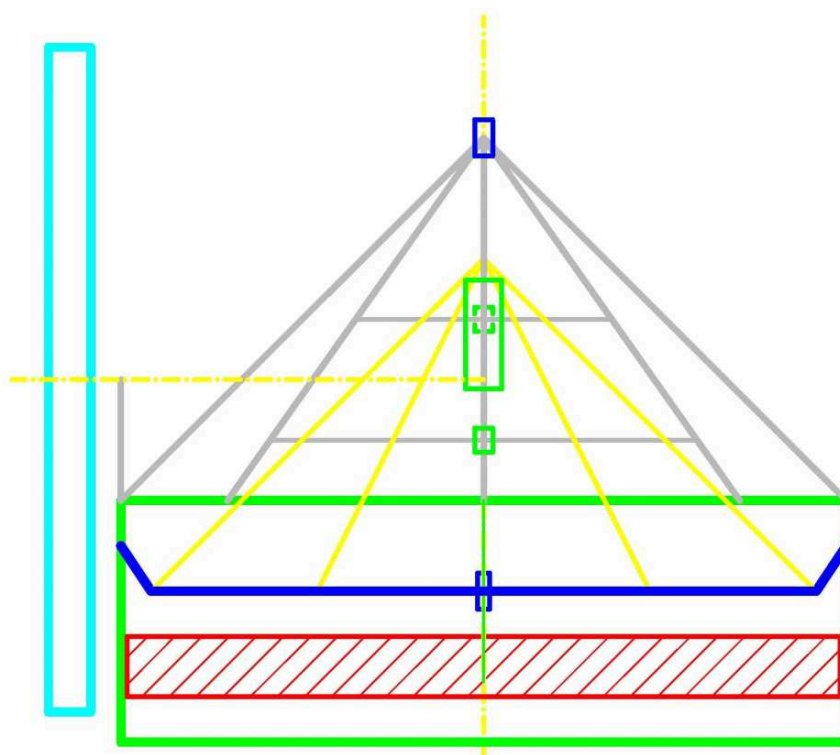
Od začátku bylo jasné, že tato elektrárna je spíše model určený pro demonstraci principu, než pro opravdové využití v praxi. Pokud by se ale povedlo vyrobit skutečně kvalitní motor, mohla by elektrárna najít uplatnění v domácích podmínkách. I Výkon závisí na použitém motoru. Pokud by byl profesionální, dalo by se uvažovat o výkonu v jednotkách kW. Tento motor by ale musel pracovat s vysokým přetlakem pracovního media (10 MPa – 20 MPa), s vodíkem nebo héliem, což je bez potřebného vývoje, speciálních materiálů a přesných obráběcích strojů nemyslitelné.

Výsledek můžeme vidět na obrázcích 9.10 a 9.11. V ohnisku je umístěn atmosférický model Stirlingova motoru. Za poledního slunce dokázala elektrárna rozsvítit diodu.



Obr. 8.11 Model solární elektrárny se Stirlingovým motorem

9. NÍZKOTEPLTNÍ STIRLINGŮV MOTOR NA SOLÁRNÍ POHON



Obr. 9.1 Schéma nízkoteplotního Stirlingova motoru na solární pohon

9.1 Popis konceptu

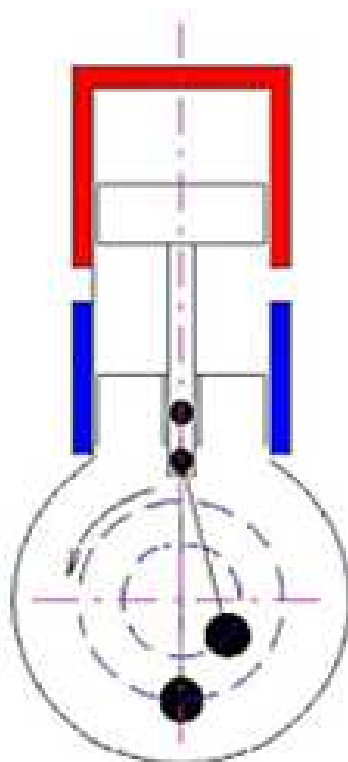
Ve zkratce bude elektrárna fungovat takto: Ve slunečním kolektoru se bude nahřívat olej, shromažďovat se bude v akumulární nádrži. Ve chvíli, kdy bude potřeba elektrická energie, přečerpá se horký olej na zahřívanou část motoru a ten se rozběhne. Setrvačnický motor bude spojen s alternátorem, který bude z mechanické energie vyrábět elektrickou.

Výhoda tohoto konceptu oproti většině konvenčních způsobů výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů je možnost produkovat elektrickou energii ve dne i v noci!

Aby bylo možné vyrobit většinu dílů v lépe vybavené domácí dílně. Rozhodl jsem se pro atmosférický motor, chlazený vodou, vnitřní médium bude vzduch.

Také jsem zvažoval, který typ Stirlingova motoru použít, zda vysokoteplotní nebo nízkoteplotní. Vysokoteplotní verze je schopná dosáhnout vyšších výkonů, ale potřebuje pro svůj chod vysoké teploty, což by bylo dosaženo jen při poledním slunci, při jasné obloze. Navíc by bylo obtížné najít vhodné médium pro přenos tepelné energie k ohřívání části motoru. Proto jsem se rozhodl pro nízkoteplotní variantu Stirlingova motoru, který nepotřebuje ke svému chodu tak vysoký rozdíl teplot. A může tedy pracovat ve dne i v noci.

Rozhodnutí pro nízkoteplotní variantu zúžilo výběr mezi modifikací beta a gama. Nakonec jsem zvolil modifikaci beta. Schéma modifikace beta můžeme vidět na obrázku 9.2.



Obr. 9.2 Modifikace beta [37]

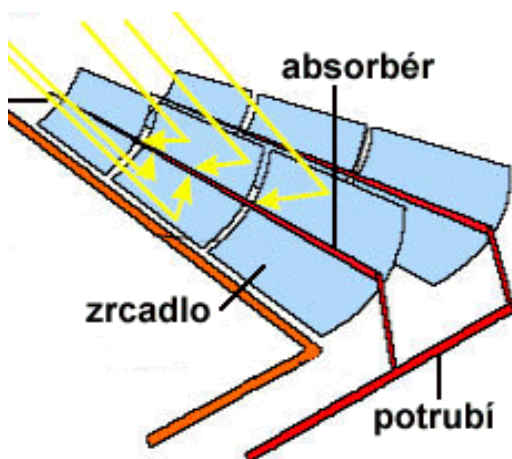
Z pohledu Stirlingova motoru potřebujeme teplotu poměrně nízkou, ale z pohledu běžných solárních kolektorů zase tak nízká není. Proto musím použít vakuové trubicové nebo žlabové sběrače, které dosahují nejvyšších teplot. Pomocí vakuových trubicových kolektorů je možné dosáhnout teploty média přes 300 °C, pomocí žlabových sběračů přes 550 °C. Řez vakuovým trubicovým kolektorem můžeme vidět na následujícím obrázku 9.3. Žlabový sběrač můžeme vidět na obrázků 9.6.



Obr. 9.3 Řez vakuovým trubicovým kolektorem [38]



Obr. 9.4 Vakuový trubicový kolektor [39]



Obr. 9.5 Princip žlabového sběrače[40]



Obr. 9.6 Reálný žlabový sběrač [41]

Také je potřeba vybrat vhodné médium, které bude sloužit k přenosu tepelné energie získané ze slunce k ohřívání části motoru. Nejjednodušší a nejlevnější by byla voda, ale tu není možné v běžném stavu ohřát na požadovanou teplotu. Po zvýšení tlaku by to bylo možné, ale v celém systému by musel být přetlak. Z důvodů zvýšení nároku na výrobu jsem tuto variantu zavrhl.

Z tabulek jsem zjistil, že aby voda vařila při 200 °C, musel by být tlak v systému 1,555 MPa.

Jako ideální médium se jeví olej. Je možné ohřát ho na požadovanou teplotu, má přijatelnou měrnou tepelnou kapacitu, navíc chrání před korozi. Nejvhodnější typ bude zřejmě podobný, jaký se používá v termo kotlích při zahřívání obalovaných směsí.

V konceptu se snažím, aby byla elektrárna co nejefektivnější, proto se nabízí využít akumulční nádrž na horký olej. Ta bude akumulovat tepelnou energii v době, kdy bude slunce svítit. Energii budeme moci využít až v době, kdy ji budeme opravdu potřebovat.

Elektrárna bude sloužit pro výrobu elektrické energie a tato bude spotřebovávána v místě zdroje. Nejvhodnější způsob přeměny mechanické energie na elektrickou je pomocí alternátoru, má vysokou účinnost přeměny mechanické energie na elektrickou a výstupem je střídavý proud.

Koncept může mít i jiné využití než je výroba elektřiny. Výstupem z motoru bude mechanická energie, tu můžeme využít různě, například pro čerpání vody.

Výkon závisí na použitém motoru. Pokud bychom použili motor, který by neměl vnitřní médium vzduch, ale například vodík nebo hélium o tlaku několika MPa (10 MPa – 20 MPa), dalo by se uvažovat o mnoho násobně vyšším výkonu. Což je bez potřebného vývoje, speciálních materiálů a špičkových obráběcích strojů nemyslitelné. V navrhovaném konceptu při teplotě média okolo 200 °C můžeme počítat s výkonem okolo 3 kW_e.

V konceptu uvažuji, že motor bude mít regulovatelný výkon tak, aby mohl co nejlépe a nejefektivněji pokrýt danou spotřebu. Případné nedostatky elektrické energie budou kryty z elektrické sítě a případné přebytky se budou akumulovat v bateriích. Aby se maximálně předešlo přebytkům energie a neefektivnímu využívání, bude motor zapínán pouze ve špičce, kdy bude všechna nebo většina elektrická energie okamžitě spotřebována.

9.2 Výpočet rozměrů, teoretické vnitřní práce a výkonu

Stanovil jsem si, že olej budu zahřívat na 200 °C. Výpočet provedu pomocí Schmidty teorie:

Schmidtova teorie

Pro výpočet Stirlingova motoru vypracoval a roku 1871 publikoval na Německém vysokém učení technickém v Praze Gustav Schmidt teorii, která vychází ze základních předpokladů:

- Motor pracuje za ustálených pracovních podmínek.
- Množství pracovní látky je stálé (bezztrátový provoz).
- Pracovní látka je ideální plyn.
- V celém pracovním prostoru motoru je okamžitý tlak stejný.
- Komprese i expanze probíhají izotermicky.
- V celém prostoru výměníku má plyn stejnou teplotu.
- Teplota v expanzním prostoru je rovna teplotě v ohříváči a je nejvyšší v celém cyklu.
- Teplota v kompresním prostoru je rovna teplotě v ohříváči a je nejnižší v celém cyklu.
- Teplota stěn v jednotlivých dílech, tvořících pracovní prostor motoru je stálá.
- Promíšení plynu v pracovních prostorech je dokonalé.
- Změna kompresního i expanzního prostoru se děje podle sinusovky s fázovým posuvem ϕ (klikový mechanismus).
- Schmidtovu teorii je možno aplikovat i na jiné mechanismy, je nutno pouze znát závislost pohybu pístů a tím i změny pracovních prostorů v závislosti na pootočení hřídele.

Z důvodu regulace výkonu motoru a efektivnějšího využití ohřátého oleje, bude zdvih přemísťovacího pístu nastavitelný od 60 mm do 150 mm. Měnit se bude podle potřeby elektrické energie. Při této regulaci můžeme používat stále stejnou teplotu média a také všechny ostatní mechanismy beze změny.

a) Výpočet výkonu pro minimální zdvih přemísťovacího pístu

Zdvihový objem kompresního prostoru:

$$V_{ZK} = \frac{\pi * D_{ZK}^2}{4} * l_{ZK} \quad (1) [1]$$

$$V_{ZK} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,15 = 0,169646003 \quad [m^3]$$

Zdvihový objem expanzního prostoru:

$$V_{ZE} = \frac{\pi * D_{ZE}^2}{4} * l_{ZE} \quad (2) [1]$$

$$V_{ZE} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,06 = 0,067858401 \quad [m^3]$$

Objem škodlivého prostoru kompresního prostoru:

$$V_{DK} = \frac{\pi * D_{DK}^2}{4} * l_{DK} \quad (3) [1]$$

$$V_{DK} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,01 = 0,011309734 \quad [m^3]$$

Objem škodlivého prostoru expanzního prostoru:

$$V_{DE} = S_{DE} * l_P + \frac{\pi * D_{DK}^2}{4} * l_{DE} \quad (4) [1]$$

$$V_{DE} = 0,0113 * 0,1 + \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,09 = 0,102917602 \quad [m^3]$$

Objem regenerátoru:

$$V_R = \frac{\pi * D_R^2}{4} * l_R \quad (5) [1]$$

$$V_R = \frac{\pi * 0}{4} = 0 \quad [m^3]$$

Okamžitý objem expanzního prostoru:

$$V_E = \frac{V_{ZE}}{2} * (1 - \cos \alpha) + V_{DE} \quad (6) [1]$$

$$V_E = \frac{0,067858401}{2} * (1 - \cos 90) + 0,00113 = 0,136846803 \quad [m^3]$$

Okamžitý prostor kompresního prostoru pro modifikaci beta:

$$V_K = \frac{V_{ZE}}{2} * (1 + \cos \alpha) + \frac{V_{ZK}}{2} * [1 - \cos(\alpha - \phi)] + V_{DK} \quad (7) [1]$$

$$V_K = \frac{0,067858401}{2} * (1 + \cos 90) + \frac{0,169646003}{2} * [1 - \cos(90 - 90)] + 0,011309734 = 0,045238934 \quad [m^3]$$

Okamžitý celkový objem:

$$V = V_E + V_K + V_R \quad (8) [1]$$

$$V = 0,136846803 + 0,045238934 + 0 = 0,182085737 \quad [m^3]$$

Hmotnost plynu (vzduchu):

$$m = \frac{p}{V} * \frac{r}{T} \quad (9) [1]$$

$$m = \frac{101\,325}{0,182085737} * \frac{287}{293,15} = 0,219290968 \quad [Kg]$$

Tlak plynu (vzduchu):

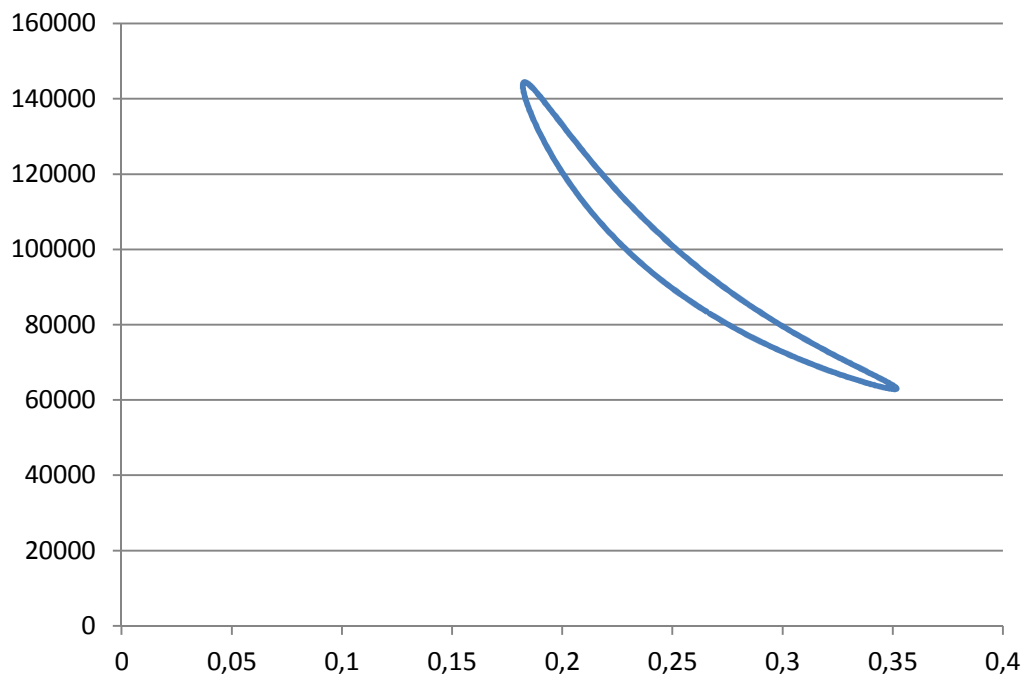
$$p = \frac{m * r}{\frac{V_E}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_K}{T_K}} \quad (10) [1]$$

$$p = \frac{0,219290968 * 287}{\frac{0,136846803}{473} + \frac{0}{388} + \frac{0,045238934}{303}} = 143487,5076 \quad [Pa]$$

pV diagram

V programu Microsoft Excel jsem si vypočítal okamžitý objem expanzního prostoru, okamžitý prostor kompresního prostoru, okamžitý celkový objem a tlak plynu pro jednotlivé stupně cyklu. Z výsledných tlaků a objemů jsem sestavil pV diagram.

Pomocí „proužkové“ metody jsem zjistil teoretickou vnitřní práci pro jednotlivé stupně, jejich sečtením jsem dostal teoretickou vnitřní práci cyklu $a_c = 1\,543\text{ J}$.



Obr 9.7 pV diagram pro minimální zdvih přemísťovacího pístu

$$P_{VN} = n * a_c \quad (11) \quad [1]$$

$$P_{VN} = 1,5 * 1\,543 = 2\,315 \quad [W]$$

Při otáčkách $n = 90\text{ ot/min}$ bude mít motor teoretický vnitřní výkon: $P_{VN} = 2\,315\text{ W}$.

b) Výpočet výkonu pro maximální zdvih přemísťovacího pístu

Zdvihový objem kompresního prostoru:

$$V_{ZK} = \frac{\pi * D_{ZK}^2}{4} * l_{ZK} \quad (1) \quad [1]$$

$$V_{ZK} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,15 = 0,169646003 \quad [m^3]$$

Zdvihový objem expanzního prostoru:

$$V_{ZE} = \frac{\pi * D_{ZE}^2}{4} * l_{ZE} \quad (2) [1]$$

$$V_{ZE} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,15 = 0,169646003 \quad [m^3]$$

Objem škodlivého prostoru kompresního prostoru:

$$V_{DK} = \frac{\pi * D_{DK}^2}{4} * l_{DK} \quad (3) [1]$$

$$V_{DK} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,01 = 0,011309734 \quad [m^3]$$

Objem škodlivého prostoru expanzního prostoru:

$$V_{DE} = S_{DE} * l_{DE} \quad (4) [1]$$

$$V_{DE} = 0,0113 * 0,1 = 0,00113 \quad [m^3]$$

Objem regenerátoru:

$$V_R = \frac{\pi * D_R^2}{4} * l_R \quad (5) [1]$$

$$V_R = \frac{\pi * 0}{4} = 0 \quad [m^3]$$

Okamžitý objem expanzního prostoru:

$$V_E = \frac{V_{ZE}}{2} * (1 - \cos \alpha) + V_{DE} \quad (6) [1]$$

$$V_E = \frac{0,169646003}{2} * (1 - \cos 90) + 0,00113 = 0,085953002 \quad [m^3]$$

Okamžitý prostor kompresního prostoru pro modifikaci beta:

$$V_K = \frac{V_{ZE}}{2} * (1 + \cos \alpha) + \frac{V_{ZK}}{2} * [1 - \cos(\alpha - \phi)] + V_{DK} \quad (7) [1]$$

$$V_K = \frac{0,169646003}{2} * (1 + \cos 90) + \frac{0,169646003}{2} * [1 - \cos(90 - 90)] + 0,011309734 = 0,096132735 \quad [m^3]$$

Okamžitý celkový objem:

$$V = V_E + V_K + V_R \quad (8) [1]$$

$$V = 0,085953002 + 0,096132735 + 0 = 0,182085737 \quad [m^3]$$

Hmotnost plynu (vzduchu):

$$m = \frac{p}{V} * \frac{r}{T} \quad (9) [1]$$

$$m = \frac{101\,325}{0,182085737} * \frac{287}{293,15} = 0,219290968 \quad [\text{Kg}]$$

Tlak plynu (vzduchu):

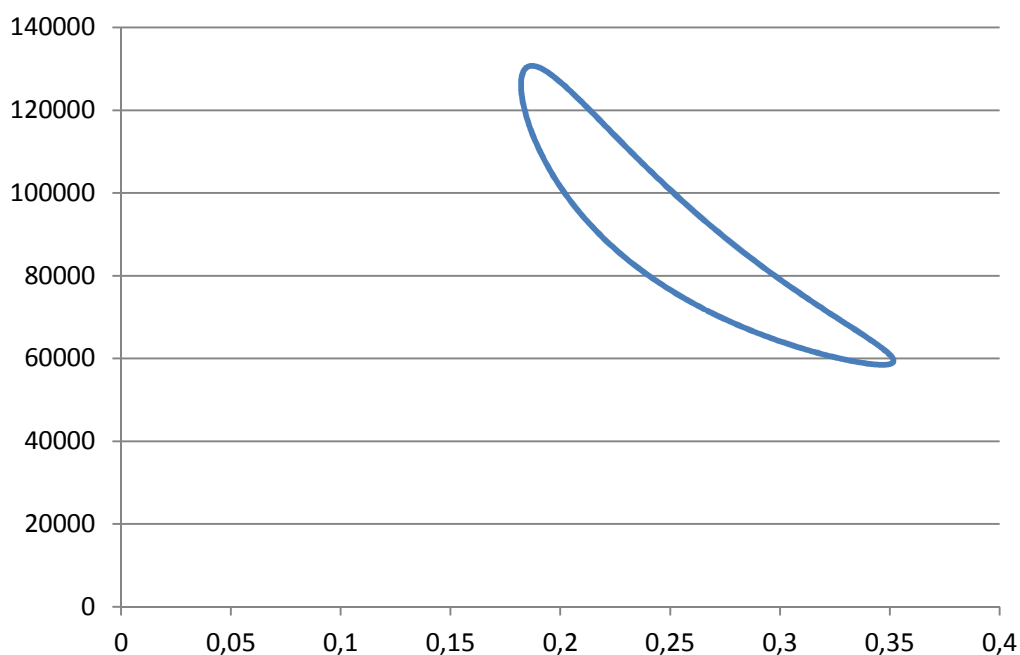
$$p = \frac{m * r}{\frac{V_E}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_K}{T_K}} \quad (10) [1]$$

$$p = \frac{0,219290968 * 287}{\frac{0,085953002}{473} + \frac{0}{388} + \frac{0,096132735}{303}} = 126128,1547 \quad [\text{Pa}]$$

pV diagram

V programu Microsoft Excel jsem si vypočítal okamžitý objem expanzního prostoru, okamžitý prostor kompresního prostoru, okamžitý celkový objem a tlak plynu pro jednotlivé stupně cyklu. Z výsledných tlaků a objemů jsem sestavil pV diagram.

Pomocí „proužkové“ metody jsem zjistil teoretickou vnitřní práci pro jednotlivé stupně, jejich sečtením jsem dostal teoretickou vnitřní práci cyklu $a_c = 3\,181\text{ J}$



Obr 9.8 pV diagram pro maximální zdvih přemísťovacího pístu

$$P_{VN} = n * a_c \quad (11) [1]$$

$$P_{VN} = 1,5 * 3\,181 = 4\,771 \quad [\text{W}]$$

Při otáčkách $n = 90\text{ ot/min}$ bude mít motor teoretický vnitřní výkon: $P_{VN} = 4\,771\text{ W}$.

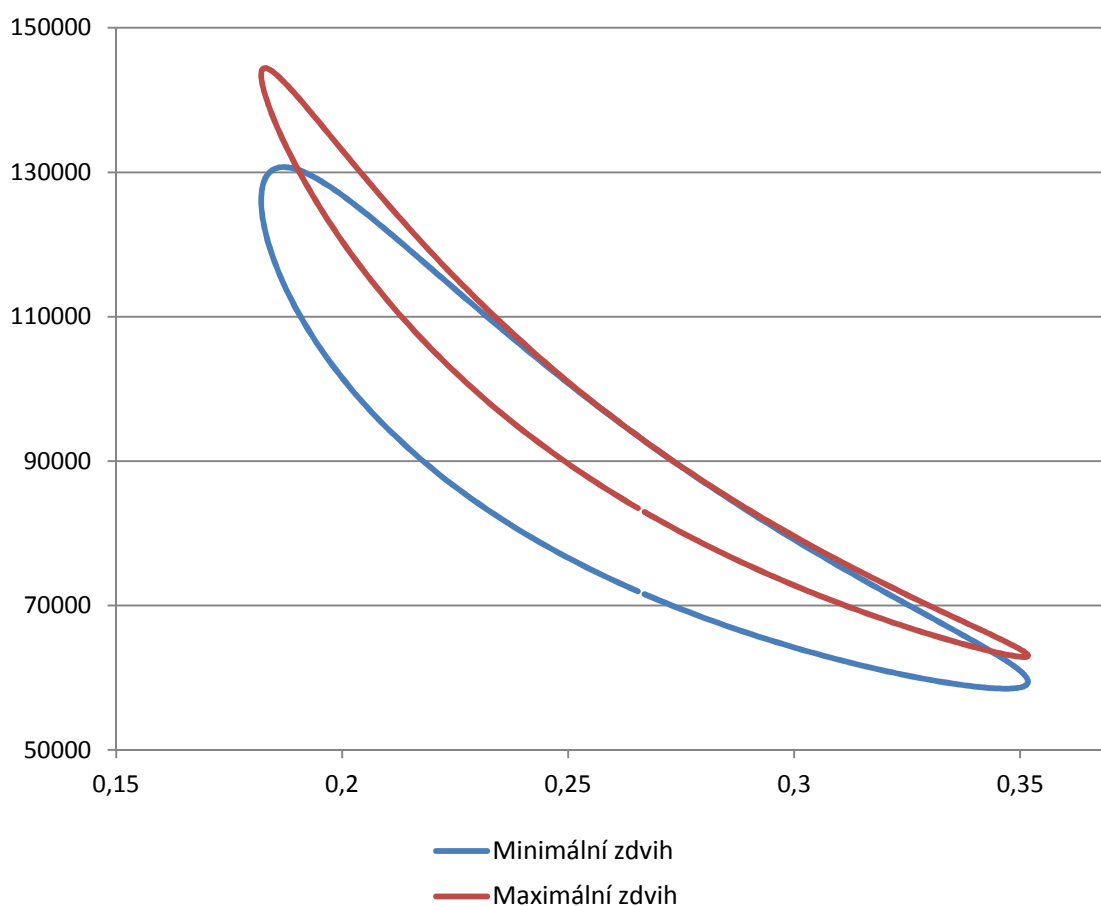
c) Zhodnocení

Z výpočtu vyplývá, že motor má při minimálním zdvihu přemísťovacího pístu teoretický vnitřní výkon cca 2,32 kW a při maximálním zdvihu přemísťovacího pístu 4,77 kW.

Teoretický vnitřní výkon by mělo být možné převést na mechanický výkon s 90 % účinností. Z toho vyplývá, že při minimálním zdvihu přemísťovacího pístu bude mechanický výkon 2,088 kW a při maximálním zdvihu přemísťovacího pístu 4,293 kW.

Mechanický výkon na elektrický je možné převést s účinností 90%. Při minimálním zdvihu přemísťovacího pístu bude elektrický výkon **1,879 kW_e** a při maximálním zdvihu přemísťovacího pístu **3,864 kW_e**.

Porovnání pV diagramů minimálního a maximálního zdvihu můžeme vidět na obrázku 9.9.



Obr 9.9 Srovnání pV diagramů minimálního a maximálního zdvihu.

9.3 Porovnání vakuového kolektoru a žlabového sběrače

Porovnání provádím při maximálním zdvihu přemísťovacího pístu. Oba systémy budu porovnávat při stagnační teplotě.

a) Vakuový trubicový kolektor

Vybral jsem si kolektor firmy SPF, typ AMK-Collectra OPC 15. Tento kolektor je specifický tím, že má na spodní straně má navíc ještě odražeč. Bližší specifikace kolektoru jsou uvedeny v příloze A.

Stagnační teplota tohoto kolektoru je 323 °C.

Zdvihový objem kompresního prostoru:

$$V_{ZK} = 0,169646003 \quad [\text{m}^3]$$

Zdvihový objem expanzního prostoru:

$$V_{ZE} = 0,169646003 \quad [\text{m}^3]$$

Objem škodlivého prostoru kompresního prostoru:

$$V_{DK} = 0,011309734 \quad [\text{m}^3]$$

Objem škodlivého prostoru expanzního prostoru:

$$V_{DE} = 0,00113 \quad [\text{m}^3]$$

Objem regenerátoru:

$$V_R = 0 \quad [\text{m}^3]$$

Okamžitý objem expanzního prostoru:

$$V_E = 0,085953002 \quad [\text{m}^3]$$

Okamžitý prostor kompresního prostoru pro modifikaci beta:

$$V_K = 0,096132735 \quad [\text{m}^3]$$

Okamžitý celkový objem:

$$V = 0,182085737 \quad [\text{m}^3]$$

Hmotnost plynu (vzduchu):

$$m = 0,219290968 \quad [\text{Kg}]$$

Tlak plynu (vzduchu):

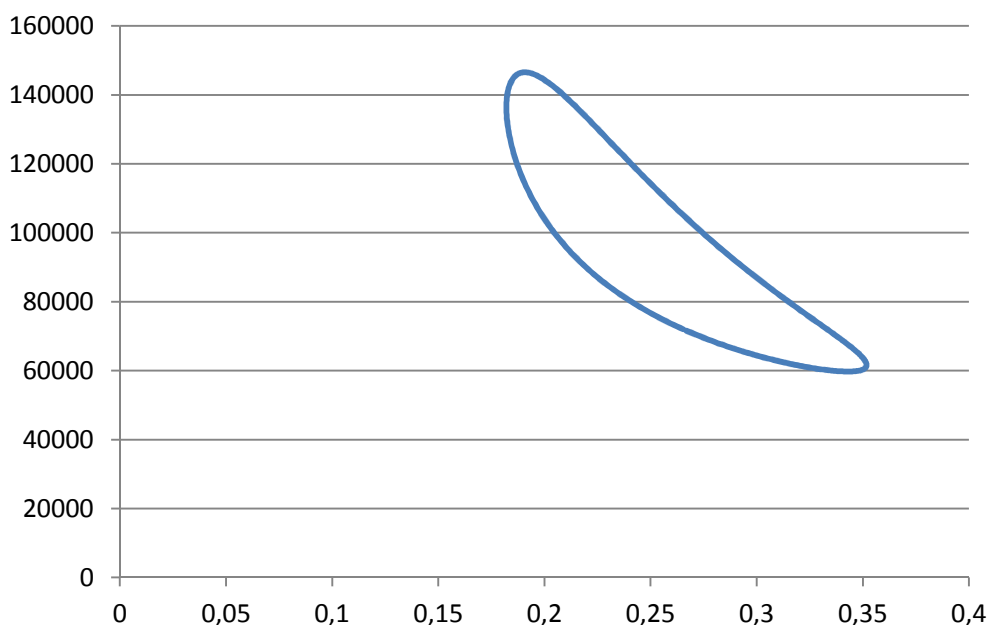
$$p = \frac{m \cdot r}{\frac{V_E}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_K}{T_K}} \quad (10) \quad [1]$$

$$p = \frac{0,219290968 \cdot 287}{\frac{0,085953002}{596} + \frac{0}{449,5} + \frac{0,096132735}{303}} = 136377,8766 \quad [\text{Pa}]$$

pV diagram

V programu Microsoft Excel jsem si vypočítal okamžitý objem expanzního prostoru, okamžitý prostor kompresního prostoru, okamžitý celkový objem a tlak plynu pro jednotlivé stupně cyklu. Z výsledných tlaků a objemů jsem sestavil pV diagram.

Pomocí „proužkové“ metody jsem zjistil teoretickou vnitřní práci pro jednotlivé stupně, jejich sečtením jsem dostal teoretickou vnitřní práci cyklu $a_c = 4\,906 \text{ J}$



Obr 9.10 pV diagram pro vakuový trubicový kolektor

$$P_{VN} = n \cdot a_c \quad (11) \quad [1]$$

$$P_{VN} = 1,5 \cdot 4\,906 = 7\,359 \quad [\text{W}]$$

Při otáčkách $n = 90 \text{ ot/min}$ bude mít motor teoretický vnitřní výkon: $P_{VN} = 7\,359 \text{ W}$.

b) Žlabový sběrač

Vybral jsem si žlabový sběrač firmy SPF, typ NEP PolyTrough 1800.

Stagnační teplota se u těchto kolektorů neuvádí, abych mohl oba systémy porovnat, musel jsem ji dopočítat. Bližší specifikace žlabového sběrače jsou uvedeny v příloze B.

Rovnice účinnostní charakteristiky kolektoru:

$$\mu = \mu_0 - a_1 * A - a_2 * A^2 * I \quad (12) \quad [6]$$

Stagnační teplotu dostanu, pokud ze systému nebudu nic odebírat, účinnost tedy bude nulová.

$$0 = 0,689 - 0,36 * A - 0,0011 * A^2 * I$$

$$A = 0,533288 \quad [K * m^2 * W^{-1}]$$

$$A = \frac{t_s - t_e}{I} \rightarrow t_s = A * I + t_e \quad (13) \quad [6]$$

$$t_s = 0,533288 * 1000 + 25 = 558 \quad [^{\circ}C]$$

Zdvihový objem kompresního prostoru:

$$V_{ZK} = 0,169646003 \quad [m^3]$$

Zdvihový objem expanzního prostoru:

$$V_{ZE} = 0,169646003 \quad [m^3]$$

Objem škodlivého prostoru kompresního prostoru:

$$V_{DK} = 0,011309734 \quad [m^3]$$

Objem škodlivého prostoru expanzního prostoru:

$$V_{DE} = 0,00113 \quad [m^3]$$

Objem regenerátoru:

$$V_R = 0 \quad [m^3]$$

Okamžitý objem expanzního prostoru:

$$V_E = 0,085953002 \quad [m^3]$$

Okamžitý prostor kompresního prostoru pro modifikaci beta:

$$V_K = 0,096132735 \quad [m^3]$$

Okamžitý celkový objem:

$$V = 0,182085737 \quad [m^3]$$

Hmotnost plynu (vzduchu):

$$m = 0,219290968 \quad [\text{Kg}]$$

Tlak plynu (vzduchu):

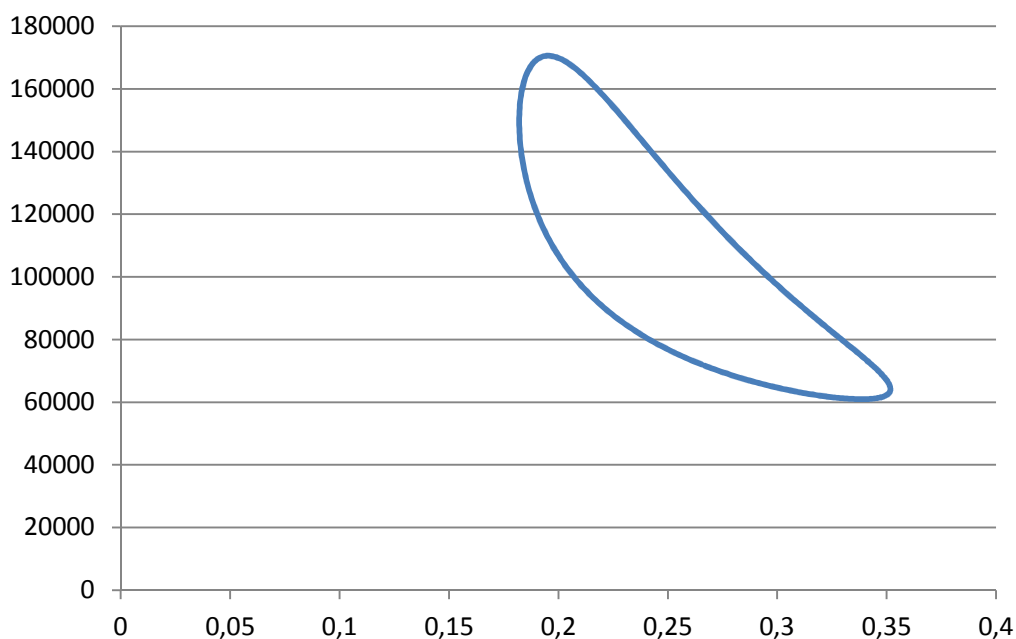
$$p = \frac{m \cdot r}{\frac{V_E}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_K}{T_K}} \quad (10) [1]$$

$$p = \frac{0,219290968 \cdot 287}{\frac{0,085953002}{831} + \frac{0}{567} + \frac{0,096132735}{303}} = 149598,4404 \quad [\text{Pa}]$$

pV diagram

V programu Microsoft Excel jsem si vypočítal okamžitý objem expanzního prostoru, okamžitý prostor kompresního prostoru, okamžitý celkový objem a tlak plynu pro jednotlivé stupně cyklu. Z výsledných tlaků a objemů jsem sestavil pV diagram.

Pomocí „proužkové“ metody jsem zjistil teoretickou vnitřní práci pro jednotlivé stupně, jejich sečtením jsem dostal teoretickou vnitřní práci cyklu $a_c = 7\,359 \text{ J}$.



Obr 9.11 pV diagram pro žlabový sběrač

$$P_{VN} = n \cdot a_c \quad (11) [1]$$

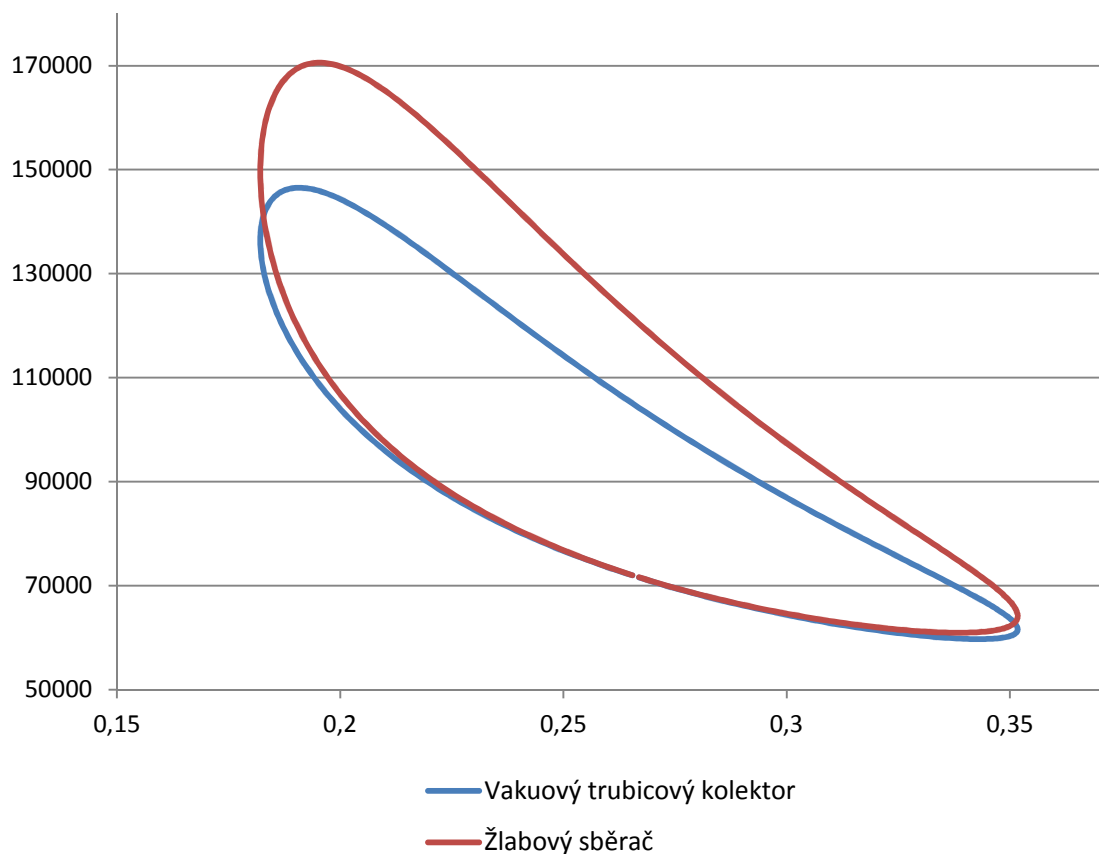
$$P_{VN} = 1,5 \cdot 7\,359 = 11\,082 \quad [\text{W}]$$

Při otáčkách $n = 90 \text{ ot/min}$ bude mít motor teoretický vnitřní výkon: $P_{VN} = 11\,082 \text{ W}$.

c) Zhodnocení

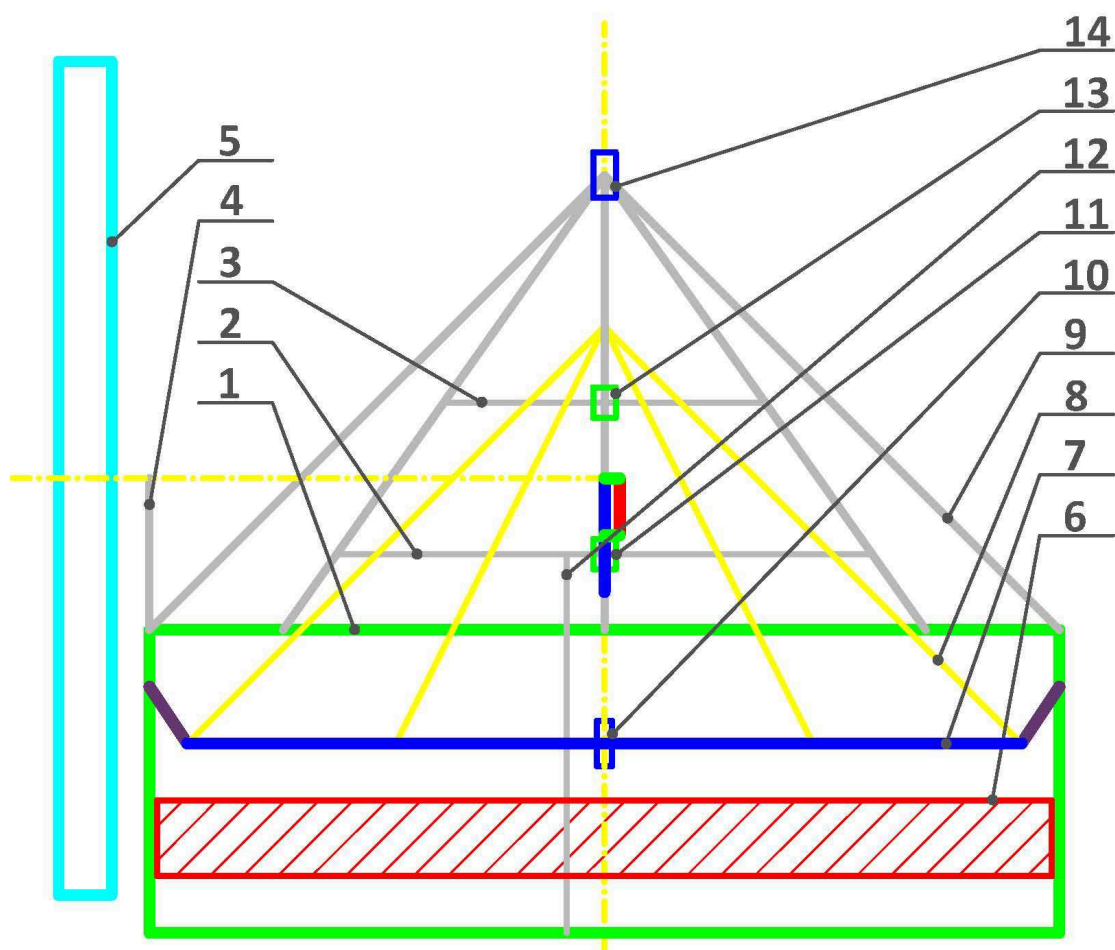
Z výpočtu vyplývá, že motor by měl při použití vakuového trubicového kolektoru teoretický vnitřní výkon cca 7,36 kW a při požití žlabového sběrače cca 11 kW. Tyto výkony jsou pouze teoretické a orientační. Takto vysokých teplot bychom nebyli schopni v reálném prostředí dosáhnout, ale pro srovnání jsou stagnační teploty systémů vyhovující.

Srovnání pV diagramů vakuového trubicového kolektoru a žlabového sběrače můžeme vidět na obrázku 9.12.



Obr 9.12 Srovnání pV diagramů vakuového trubicového kolektoru a žlabového sběrače

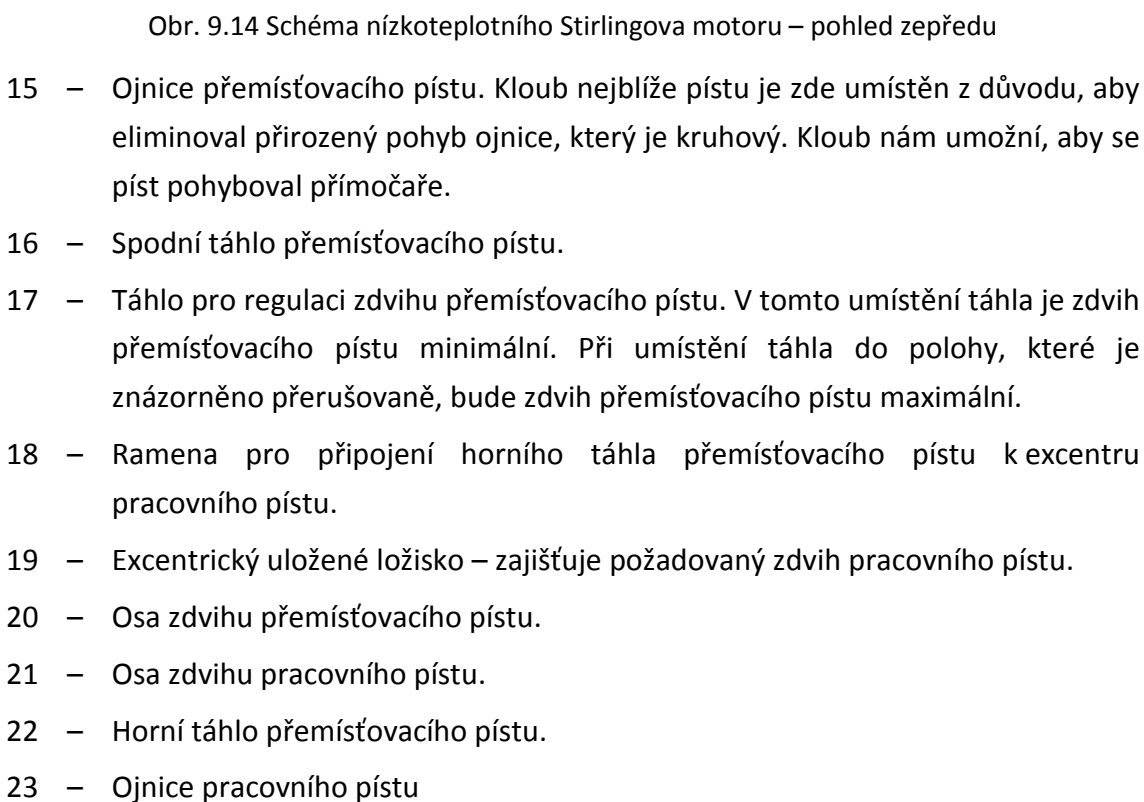
9.4 Konstrukce motoru



Obr. 9.13 Schéma nízkoteplotního Stirlingova motoru – pohled z boku

- 1 – Expanzní válec.
- 2 – Nosná konstrukce spodního kloubu přemísťovacího pístu.
- 3 – Nosná konstrukce horního kloubu přemísťovacího pístu. Tyto dva klouby jsou součástí pákového mechanismu, který zajišťuje regulaci zdvihu přemísťovacího pístu.
- 4 – Podpěra hřídele setrvačníku, druhá podpěra je umístěna ve vertikální ose motoru.
- 5 – Setrvačník.
- 6 – Přemísťovací píst. Píst musí být vyroben z lehkého materiálu, aby nebylo potřeba příliš energie na jeho zastavení a opětovné uvedení do chodu v horní a dolní úvrati. Na tento píst nepůsobí velké síly. Uvnitř motoru nebude příliš velká teplota. Při konstrukci pístu je nutné brát na tyto skutečnosti ohled. Správný pohyb pístu v ose zajišťuje ojnice pístu (15) a vodící tyč (12).

- 7 – Pracovní píst. Píst je s válcem spojen pružnou blánou – ve schématu je znázorněna fialovou barvou. Blána je trvale spojena s válcem na jednom místě. Tímto způsobem je zajištěno snadné těsnění celého prostoru. Navíc je odstraněno tření pracovního pístu, které by zbytečně snižovalo výkon motoru.
Pohyb pístu v ose zajišťuje vedení pracovního pístu (14) a vodící tyč (12).
- 8 – Nosná konstrukce pracovního pístu. Konstrukce je k pístu připevněna na osmi místech, aby byl píst rovnoměrně zatěžován a zvedán.
- 9 – Nosná konstrukce motoru, skládá se z osmi podpěr.
- 10 – Těsnění pracovního prostoru. Toto je jediné místo, kde může vzduch (pracovní médium) ze systému unikat.
- 11 – Spodní kloub přemísťovacího pístu.
- 12 – Vodící tyč přemísťovacího a pracovního pístu. Z pohledu obou pístů zajišťuje správný pohyb ve vertikální ose motoru.
Z pohledu přemísťovacího pístu ještě zajišťuje, aby nedošlo k poškození („vymačkání“) těsnění pracovního prostoru (10), vlivem pohybu ojnice přemísťovacího pístu, který je kruhový.
- 13 – Horní kloub přemísťovacího pístu.
- 14 – Vedení pracovního pístu – Zajišťuje správný pohyb pracovního pístu.



9.5 Výpočet množství oleje

Jako teplotonosné médium jsem si vybral olej Thermol 68 od výrobce MOL-LUB Ltd. Bližší specifikace oleje jsou uvedeny v příloze C.

Mezi největší výhody tohoto oleje patří:

- Vynikající vlastnosti pro přenos tepla.
- Výborná tepelná stabilita.
- Odolnost proti korozi a oxidaci.
- Není toxický
- Snadná likvidace.

Při teplotě 200 °C má olej tyto vlastnosti:

- Měrná tepelná kapacita: $c_p = 2\,530 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Hustota $\rho = 760 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$

a) Pro maximální zdvih přemísťovacího pístu

Převod Wh na J:

$$W_h \cdot 3\,600 = J$$

$$3\,864 \cdot 3\,600 = 13\,910\,400 \quad [J]$$

Výpočet množství oleje:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (14) [5]$$

$$m = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta t} = \frac{13\,910\,400}{2\,530 \cdot 170} = 32,3 \quad [\text{Kg}]$$

Přepočet na litry oleje:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (15) [5]$$

$$V = \frac{32,3}{760} = 0,04256 \quad [\text{m}^3]$$

$$V = 42,56 \quad [l]$$

b) Pro minimální zdvih přemísťovacího pístu

Převod Wh na J:

$$Wh * 3\,600 = J$$

$$1\,879 * 3\,600 = 6\,764\,400 \quad [J]$$

Výpočet množství oleje:

$$Q = m * c_p * \Delta t \quad (14) \quad [5]$$

$$m = \frac{Q}{c_p * \Delta t} = \frac{6\,764\,400}{2\,530 * 170} = 15,7 \quad [Kg]$$

Přepočet na litry oleje:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (15) \quad [5]$$

$$V = \frac{15,7}{760} = 0,02069 \quad [m^3]$$

$$V = 20,69 \quad [l]$$

9.6 Základní specifikace motoru

Rozměry motoru jsem zjistil zpětným dopočtem ze Schmidty teorie při stanovení požadovaného výkonu.

Vnitřní médium:	Vzduch
Pracovní tlak:	Atmosférický
Modifikace:	Beta
Teplotní provedení:	Nízkoteplotní
Teplota teplotnosného média:	200 °C
Otáčky:	90 ot/min
Předpokládány výkon:	3 kW _e
Teplotnosné médium:	Olej
Chlazení:	Voda
Průměr válce:	1,2 m
Zdvih přemísťovacího pístu:	60 – 150 mm
Zdvih pracovního pístu:	150 mm

10. STIRLINGŮV MOTOR V ČESKÉ REPUBLICE A VE SVĚTĚ

Vývoj Stirlingova motoru probíhá v různých oblastech. Hlavně proto, že se klade čím dál větší důraz na ekologii a snahu o využití i jiných paliv než kapalných a plyných, jak je tomu u spalovacích motorů. Významně se na tomto vývoji podílí Ford, General Motor, Honda. Tyto firmy se zaměřují spíše na využití v autech. V podobných zařízeních se využívá hybridního systému. To znamená, že Stirlingův motor jede konstantní rychlostí, alternátor vyrábí elektrický proud, který se uchovává v akumulátoru, ten pak podle potřeby pohání elektromotor.

Je všeobecně známo, že u běžného spalovacího motoru je využita pouze jedna třetina paliva, zbylé dvě třetiny se odvedou ve formě tepla do ovzduší. Firma Honda proto vyvíjí Stirlingův motor, který umístí do výfukového potrubí a bude tak využívat alespoň část tepla, které by jinak bylo odvedeno do ovzduší ve formě ztrát.

10.1 TEDOM s.r.o.

Spoustu dalších firem vyvíjí kogenerační jednotky nebo agregáty na výrobu elektrické energie. Kogenerační jednotkou se zabývala i česká firma TEDOM s r.o. V roce 2001 padlo ve firmě TEDOM s.r.o. rozhodnutí zahájit vývoj kogenerační jednotky na bázi Stirlingova motoru. Začínat od nuly bylo značně odvážné rozhodnutí. Nicméně práce na vývoji byly zahájeny na počátku roku 2002. V letech 2002 a 2003 byl vývoj prováděn částečně za podpory MPO v rámci projektu s názvem „Výzkum a vývoj zařízení na kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla ve výkonové třídě mikrokogenerace na bázi Stirlingova motoru s možností spalování biomasy“. Později probíhal vývoj již za vlastního financování a celkové náklady projektu značně přesáhly 40 miliónů Kč. V průběhu prací byl několikrát přehodnocen původní účel nasazení motorů. V roce 2008 bylo rozhodnuto, že dosavadní vývoj bude aplikován na solární variantu. Bylo dohodnuto, že TEDOM s.r.o. dodá motorovou jednotku a společnost Strojírny Bohdalice a. s. dodá vše potřebné k solární variantě s parabolickým zrcadlem. Cílem bylo, aby první komerční verze motoru byla solární jednotka s výkonem 10 kW_e. Cílové parametry byly stanoveny následovně:

- Výkon motoru 11 kW při 1500 min⁻¹.
- Elektrická účinnost min. 25 % při teplotách 650 °C/60 °C (teplota žárové hlavy/vstupní teplota do motoru).
- Pracovní médium helium.
- Maximální střední tlak pracovního plynu 14 MPa.
- Servisní interval 2 roky.
- Minimální životnost do generální opravy 25 000 hodin.

- Nízká cena motoru, zajišťující budoucí komerční úspěch solární jednotky.

Roku 2010 firma TEDOM s. r.o. vývoj kogenerační jednotky ukončila, protože motor nedosahoval požadovaných výsledků.

Systém dosahoval těchto parametrů:

- Výkon 7 kW.
- Otáčky 1 500 za minutu.
- Tlak hélia 10 MPa.
- Účinnost 22,1 %.

Celý projekt byl převeden do společnosti Strojírny Bohdalice a.s., kde se snaží využít získané zkušenosti pro stavbu solární aplikace Stirlingova motoru na bázi koncentračního systému.

10.2 MSI

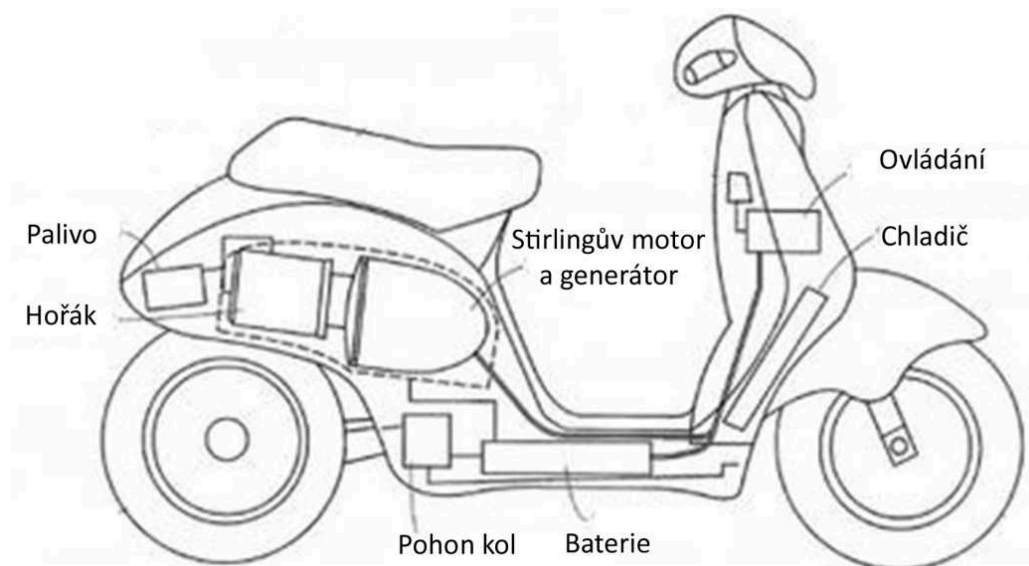
Stirlingovým motorem se zabývá také výrobce počítačů MSI. Roku 2002 si nechala patentovat princip chlazení základní desky pomocí Stirlingova motoru.



Obr. 10.1 Základní deska počítače se Stirlingovým motorem [42]

10.3 Dean Kamen

Také vynálezce Segway se zabýval vývojem Stirlingova motoru. Do vývoje investoval 50 mil. USD. Chtěl vytvořit kolo nebo spíš skútr, který jak říkal: „Pojede na cokoli, co hoří.“ Energie ze Stirlingova motoru se bude pomocí alternátoru přeměňovat na elektrickou energii, ta se bude ukládat do akumulátoru a ten bude pohánět elektromotor. Schéma konceptu můžeme vidět na obrázku 10.2.



Obr. 10.2 Skútr se Stirlingovým motorem [43]

10.4 NASA

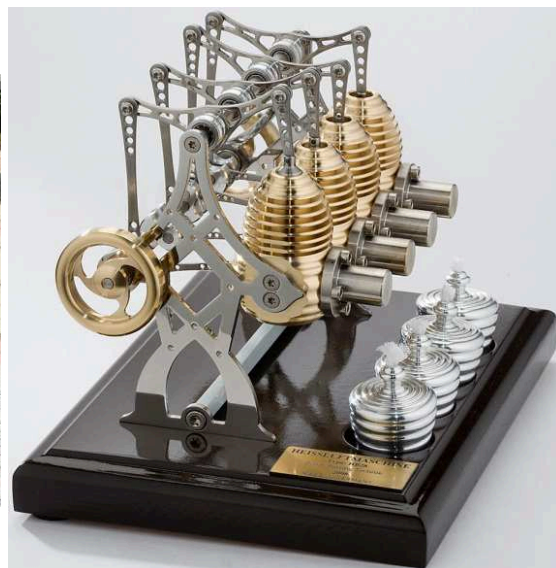
Dokonce i NASA pracuje na vývoji Stirlingova motoru. Hledá takový zdroj energie, který by byl co nejmenší, ale zároveň, aby byl dostatečně výkonný pro napájení vesmírné stanice. Elektrárna také nesmí být náročná na údržbu a nesmí být poruchová. Použila by se také v plánovaném výzkumném středisku na Měsíci, které chce vybudovat do roku 2020. Podobný zdroj energie bude potřeba také při letu na Mars. Stirlingův motor NASA používá jako zdroj tepla plutonium 238, které vydává při svém rozpadu teplo.

10.5 Modelářství

Stirlingovým motorem se baví spousta kutilů po celém světě. Je to dáno poměrně jednoduchou konstrukcí motoru. „Plechovkový“ model zvládne vyrobit naprosto každý. Existuje nepřeberné množství různých variant a úprav motoru. Některé jsou opravdu mistrovská díla.



Obr. 10.3 Model Stirlingova motoru [44]



Obr. 10.4 Model Stirlingova motoru [45]

Modelářskou lahůdkou je tzv. LTD Stirling. Je to modifikace gama a pracuje s velmi malým rozdílem teplot, což znamená, že mu ke svému chodu stačí teplo lidské ruky. Světový rekord je údajně 2,4°C. Tyto extrémní případy se v praxi nedají využít pro svůj zanedbatelný výkon.



Obr. 10.5 LTD Stirlingův motor [46]



Obr. 10.6 LTD Stirlingův motor [47]

11. ZÁVĚR

Jedná se o nízko-teplotní, atmosférický Stirlingův motor – modifikace beta. Vnitřní médium je vzduch. Rozdíl teplot je 170 °C. Očekávaný výkon kolem 3 kW_e. Ohříváný bude olejem, chlazený vodou.

Sluneční energii budu koncentrovat v oleji, který budu shromažďovat v akumulační nádrži. K přenosu solární energie na tepelnou energii budu používat vakuové trubicové kolektory nebo žlabové sběrače.

Ve chvíli, kdy bude potřeba elektrická energie, přečerpá se horký olej k zahřívání části motoru a ten začne vyrábět elektřinu. Akumulační nádrž bude formou dvou spojených nádob. Ochlazený olej se bude přečerpávat do druhé nádoby.

Mechanickou energii budu přeměňovat na elektrickou pomocí alternátoru. Výstupem je střídavý proud a má vysokou účinnost přeměny mechanické energie na elektrickou.

Při předpokládaném rozdílu teplot bude mít motor elektrický výkon 1,879 kW_e při minimálním zdvihu přemístovacího pístu a 3,864 kW_e při maximálním zdvihu přemístovacího pístu. Zdvih přemístovacího pístu je regulovatelný, aby bylo možné co nejeefektivněji pokrývat spotřebu elektrické energie a nevznikaly velké přebytky, se kterými by bylo náročné smysluplně nakládat.

Motor bude zapínán pouze ve špičce a takovým způsobem, aby byla všechna nebo většina elektrické energie ihned spotřebována. Případné přebytky budou akumulovány v bateriích. Případné nedostatky budou pokrývány ze sítě.

Pomocí Schmidovy teorie jsem spočítal, že pro požadovaný výkon musí mít válec průměr 1,2 m. Pracovní píst bude mít průměr také 1,2 m. Expanzní píst bude menší o vůli mezi válcem a pístem. Rozměrům motoru by mohl odpovídat setrvačnick o průměru 1,1 m.

Tento koncept je ideálně realizovatelný v rovníkových oblastech a místech znázorněných na obrázku 7.1. V našich podmínkách je to spíše podnět pro kutily a příznivce Stirlingova motoru. V letních měsících by měla elektrárna pracovat optimálně. V zimních měsících zřejmě fungovat nebude, protože je nižší intenzita slunečního záření. V našem prostředí nepředpokládám výrazné rozšíření z důvodu nízké využitelnosti, tudíž špatné návratnosti investice. Pro kutily, kterým je blízká myšlenka více osamostatnit svůj dům od energetické sítě to může být zajímavý koncept.

Mezi největší přínosy konceptu považuji možnost vyrobit motor v lépe vybavené domácí dílně. Není potřebná extrémně přesná výroba – je možné použít běžné stroje a běžně dostupné materiály. Má jednoduchou konstrukci, s minimem pohyblivých částí. Elektřinu můžeme vyrábět, pouze když ji zrovna potřebujeme.

12. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

Literatura:

- [1] MÍKA, Jiří. *Kogenerace s pístovými motory s vnitřním a vnějším spalováním: [Cogeneration with [i.e. with] piston internal and external engines] : teze habilitační práce ke jmenování docentem v oboru Energetické stroje a zařízení*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004, 27 s. ISBN 80-248-0703-3.
- [2] ORGAN, Allan J. a Foreword by T. FINKELSTEIN. *Thermodynamics and gas dynamics of the Stirling cycle machine*. [Digitally printed version 2010]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 05-211-3179-0.
- [3] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 158 s. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [4] ŠKORPÍK, Jiří. *Příspěvek k návrhu Stirlingova motoru: A contribution of the Stirling engine*. Brno: VUT FSI, 2008, 30 s. ISBN 978-80-214-3763-0.
- [5] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. 1. vyd. Praha: Prometheus, c2003, 276 s. ISBN 80-719-6264-3.
- [6] KAMINSKÝ a VRTEK. VŠB-TU OSTRAVA. *OBNOVITELNÉ A ALTERNATIVNÍ ZDROJE ENERGIE: interní učební texty*. Ostrava, 2002.
- [7] SCHMIDT THEORY FOR STIRLING ENGINES. HIRATA, KOICHI. *SCHMIDT THEORY FOR STIRLING ENGINES* [online]. 1997 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/schmidt/schmidt.htm>
- [8] SENFT, James R. *An introduction to Stirling engines*. 4. printing. River Falls, Wis: Moriya Press, 1998. ISBN 978-096-5245-500.
- [9] ROY DARLINGTON, Keith Strong. *Miniature hot air engines*. Ramsbury: Crowood, 2005. ISBN 978-186-1266-880.

Tabulky:

- [10] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. 1. vyd. Praha: Prometheus, c2003, 276 s. ISBN 80-719-6264-3.

Obrázky:

- [11] *Edit International - At Last, Good News* [online]. 2009 [cit. 2014-24-05]. Dostupné z: <http://www.editinternational.com/print.php?id=491ddd1e6b54d>
- [12] *Industrial Revolution* [online]. 2003 [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: <http://education.datapeak.net/industrialrevolution.htm>
- [13] HELSING. *Beta stirling* [online]. 2007 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta_stirling_animation.gif
- [14] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [15] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [16] HELSING. *Beta stirling* [online]. 2007 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta_stirling_animation.gif
- [17] HELSING. *Beta stirling* [online]. 2007 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta_stirling_animation.gif
- [18] HELSING. *Beta stirling* [online]. 2007 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta_stirling_animation.gif
- [19] HELSING. *Beta stirling* [online]. 2007 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta_stirling_animation.gif
- [20] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [21] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [22] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [23] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2011 [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [24] WHEELER, Richard. *Alpha Stirling* [online]. 2007 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z:

http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3AAlpha_Stirling.gif

- [25] WHEELER, Richard. *Beta Stirling* [online]. 2007 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Stirling%C5%AFv_motor#mediaviewer/Soubor:Beta_Stirling_frame_16.png
- [26] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [27] *Upraveno autorem z:*
Solar power from the desert rather than desert in Germany: renewable energy in a trans-European context [online]. 2007 [cit. 2014-10-02]. Dostupné z: http://www.solarserver.com/solarmagazin/solar-report_0207_e.html
- [28] *Upraveno autorem z:*
Solar power from the desert rather than desert in Germany: renewable energy in a trans-European context [online]. 2007 [cit. 2014-10-02]. Dostupné z: http://www.solarserver.com/solarmagazin/solar-report_0207_e.html
- [29] *Upraveno autorem z:*
Tessera Solar | North America | Power From Stirling Energy Systems [online]. 2010 [cit. 2014-11-02]. Dostupné z: <http://www.graphique-us.com/clients/Tessera/north-america/>
- [30] *SunCatcher Solar Thermal Technology : Susty* [online]. 2006 [cit. 2014-20-02]. Dostupné z: <http://susty.com/suncatcher-solar-thermal-technology-stirling-energy-systems/>
- [31] *Huge Solar Plants With Stirling Engines* [online]. 2005 [cit. 2014-22-02]. Dostupné z: <http://www.treehugger.com/renewable-energy/huge-solar-plants-with-stirling-engines.html>
- [32] *Solar Thermal Energy* [online]. 2006 [cit. 2014-22-02]. Dostupné z: <http://nared.org/solar-energy/solar-thermal-energy/>
- [33] *Concentrating Solar Power* [online]. 2009 [cit. 2014-22-02]. Dostupné z: <http://www.seia.org/policy/solar-technology/concentrating-solar-power>
- [34] *The SunCatcher: Concentrating Solar Dishes Set Efficiency Record* [online]. 2009 [cit. 2014-22-02]. Dostupné z: <http://inhabitat.com/the-suncatcher-solar-power-comes-into-focus/>

- [35] *Upraveno autorem z:*
SunCatcher Solar Thermal Technology [online]. 2006 [cit. 2014-16-03]. Dostupné z: <http://susty.com/suncatcher-solar-thermal-technology-stirling-energy-systems/>
- [36] *Upraveno autorem z:*
SunCatcher Solar Thermal Technology [online]. 2006 [cit. 2014-16-03]. Dostupné z: <http://susty.com/suncatcher-solar-thermal-technology-stirling-energy-systems/>
- [37] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [38] *Vakuový trubicový kolektor - 24 trubic* [online]. 2013 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.obchodsolar.cz/obchodsolar/eshop/8-1-Solarni-kolektory/0/5/87-Vakuovy-trubicovy-kolektor-24-trubic>
- [39] *BAX-SOLAR-T vakuové trubicové sluneční kolektory* [online]. 2013 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: http://www.barxenergy.cz/bax_solar_t/
- [40] *SOLÁRNÍ ENERGIE* [online]. 2006 [cit. 2014-04-06]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k23.htm>
- [41] *Solarthermische Kraftwerke: Technologie-Transfer in den "Sonnengürtel"* [online]. 2003 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.solarserver.de/solarmagazin/artikelmai2003.html>
- [42] *Stirlingův motor* [online]. 2012 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/>
- [43] *Stirlingův motor* [online]. 2012 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/>
- [44] *Hot Air Stirling Engine Motor Generator Education Toy Kits Electricity M16-V4-D* [online]. 2014 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://www.ebay.com/itm/Hot-Air-Stirling-Engine-Motor-Generator-Education-Toy-Kits-Electricity-M16-V4-D-/310707249855?pt=Model_Kit_US&hash=item48579862bf
- [45] *Ministeam Boehm Stirling Technik HB28* [online]. 2008 [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: http://www.ministeam.com/acatalog/info_BOHB28.html

- [46] *Solar-Stirlingmotor - Ausführung "Solar Edelstahl"* [online]. 2014 [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: http://www.ltd-stirling.eu/shop/article_5/Solar-Stirlingmotor--Ausf%C3%BChrung-%22Solar-Edelstahl%22.html?sessid=slLEGT0Jvv5oL6dWD1x2BT0jyWSjQzxd3X41p8ID0yCaYgMNUeg82ekpiftyugd1&shop_param=cid%3D4%26aid%3D5%26
- [47] *MM-7 Stirling Engine* [online]. 2014 [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:MM-7_Stirling_Engine.jpg